Handbuch Numerische Steuerungen

VEM

HANDBUCH

Numerische Steuerungen

VT

0120173

VEM-Handbuch Hochstromtechnik

Grundlagen, Dimensionierung und Ausführung von Hochstromanlagen

Autorenkollektiv

1. Auflage 1975. Format 14,7 cm × 21,5 cm, 599 Seiten, 376 Bilder, 132 Tafeln, Kunstleder, 48,00 Mark

Mit dem VEM-Handbuch „Hochstromtechnik" liegt die erste geschlossene und umfassende Darstellung aller die Technik hoher Stromstärken betreffenden theoretischen und anwendungsbezogenen Probleme vor. Hochstromanlagen sind charakterisiert durch Stromstärken > 3 kA bis gegenwärtig etwa 300 kA. Hohe Stromstärken treten sowohl bei der Ableitung der elektrischen Energie von Großgeneratoren (Elektroenergieerzeugung) und beim Betrieb von industriellen Großverbrauchern, vor allem in der metallurgischen Industrie (Schmelz- und Erwärmungsanlagen, Härteöfen) und in der chemischen Industrie (Elektrolyseanlagen für Aluminium- und Chlorerzeugung, Reduktionslichtbogenöfen, z. B. zur Erzeugung von Karbid und Phosphor) auf, außerdem in vielen anderen Industriezweigen bei der Anwendung von elektrothermischen Verfahren.

Das VEM-Handbuch „Hochstromtechnik" ist das Werk eines Autorenkollektivs, bestehend aus Wissenschaftlern und erfahrenen Fachkollegen der Industriepraxis unter der Leitung von Prof. *Fritz Schultheiß*. Sie haben, ausgehend von der Darlegung der theoretischen Grundlagen und den Verknüpfungen elektrotechnischer, wärmetechnischer, werkstofftechnischer und technologischer Erkenntnisse, alle die Hochstromtechnik betreffenden Probleme in anwendungsbereiter Form dargelegt.

Der Inhalt des Buches umfaßt die theoretischen Grundlagen zur Berechnung der Hochstromfortleitung und Bemessung der Leitungen, besonders der mechanischen und thermischen Festigkeit, die Näherungs- und Umgebungsbeeinflussungen, die Kennwerte der Hochstrombetriebsmittel sowie die Technik, Prüfung und Instandhaltung von Hochstromanlagen. Besonders wertvoll sind die Ausführungen zur Optimierung in bezug auf Herstellungs- und Betriebskosten, energetischen Wirkungsgrad und Materialeinsatz.

Für Projektanten, Errichter und Betreiber wird das Buch ein wichtiges Mittel zur Erhöhung der Arbeitsproduktivität und zur Verbesserung der Qualität der Arbeit sein, für die Forschung und Lehre ein unentbehrliches Nachschlagewerk.

Numerische Steuerungen haben große volkswirtschaftliche Bedeutung bei der Erhöhung der Effektivität der Produktion durch Intensivierung. Dabei ist der Einsatz numerischer Steuerungen für diskontinuierliche Prozesse (nicht nur im Werkzeugmaschinenbau) speziell in der Klein- und Mittelserienfertigung geeignet.

Hauptanliegen des VEM-Handbuchs „Numerische Steuerungen" ist es, den erreichten Wissensstand des Fachgebiets NC-Technik zusammenzufassen und in geeigneter Form für Ingenieure und Fachleute der Automatisierungstechnik, aber auch für Entwicklungsingenieure, Technologen und Ökonomen des Be- und Verarbeitungsmaschinenbaus so darzulegen, daß deren Inhalt und Aufgabe erkannt und die mögliche Einsatzbreite ausgeschöpft wird.

Autor dieses neuen Werkes in der Reihe der bewährten VEM-Handbücher ist Dr.-Ing. *Hans-Jochen Bartsch*, Nationalpreisträger und Verdienter Techniker des Volkes, ein hervorragender Kenner der Materie, der zusammen mit dem von ihm angeleiteten Entwicklungskollektiv im VEB Starkstrom - Anlagenbau Karl-Marx-Stadt maßgeblichen Anteil an der Entwicklung der Numerik in der DDR, speziell von Numerik-Baugruppensteuerungen, hat.

Das Gebiet wird vom Blickwinkel der Automatisierungs- und Steuerungstechnik aus betrachtet, wobei eine einseitige Orientierung auf die „numerisch gesteuerte Werkzeugmaschine" vermieden wird. Neben

den mathematischen Grundlagen für Aufbau und Funktion von zeichenverstehenden Automaten (Definition für die numerische Steuerung in Verbindung mit der automatischen Lagerückmeldung), Methoden und Systemen der Weg- und Winkelmessung, den für die Steuerungseinrichtungen verwendeten elektronischen integrierten Schaltungen und ihren Einsatzbedingungen werden in erster Linie die Baugruppen und Einrichtungen der inneren Datenverarbeitung von numerischen Steuerungen untersucht; denn vom Schaltungsentwurf hängen entscheidend die Einsatzbreite und die Ökonomie numerischer Steuerungen ab. Probleme der Konstruktion und Technologie, der Zuverlässigkeit, der Prüfung, Inbetriebnahme und des Service werden behandelt, Hinweise für die Programmierung gegeben und schließlich einige interessante Aspekte über die künftige Entwicklung der NC-Technik, die sich noch in vollem Fluß befindet, diskutiert.

Das Buch wird allen auf dem Gebiet der Automatisierungstechnik tätigen Entwicklern und Konstrukteuren ein wichtiges Nachschlagewerk sein und ist darüber hinaus zur Anwendung im Hoch- und Fachschulstudium geeignet.

Beachten Sie bitte auch die Innenseiten dieses Schutzumschlages!

DDR 25,00 M

REICHE / GLÖCKNER

VEM-Handbuch
Maschinelles Berechnen elektrischer Maschinen

1. Auflage 1973. Format 14,7 cm × 21,5 cm, 339 Seiten, 261 Bilder, 5 Tafeln. Kunstleder, 28,00 Mark

Eine wichtige Voraussetzung zur Entlastung des schöpferisch tätigen Ingenieurs von geistiger Routinearbeit ist der Einsatz der maschinellen Berechnungstechnik. Sie führt zur Verkürzung der Entwicklungszeiten der Erzeugnisse und zu deren optimaler Auslegung.

Auf dem Gebiet der elektrischen Maschinen werden die bisher üblichen langwierigen und z.T. ungenauen Berechnungen von Hand immer mehr durch die rationellen und genaueren maschinellen Berechnungsverfahren abgelöst. Aufgabe des VEM-Handbuchs „Maschinelles Berechnen elektrischer Maschinen" ist es, Entwicklungsingenieure und Konstrukteure mit dieser neuen Technik vertraut zu machen, die heute schon in fast alle Bereiche der Elektrotechnik ihren Eingang gefunden hat. Obwohl die Autoren aus ihren langjährigen Erfahrungen heraus den Stoff am Beispiel der elektrischen Maschinen abhandeln, ist er für Leser aus allen Bereichen der Elektrotechnik ein wertvolles Hilfsmittel zur Einarbeitung in die Methoden des maschinellen Berechnens.

Einführend werden die prinzipiellen Arbeitsweisen von Rechenautomaten, die gerätetechnische Ausrüstung derselben und die Verständigung mit dem Rechenautomaten behandelt. Es folgen Hinweise auf den günstigsten Einsatz der verschiedenen Rechenautomaten und ihre Besonderheiten bei den einzelnen Berechnungsproblemen. Neben den Berechnungen für die Entwicklung und Konstruktion der elektrischen Maschinen werden auch Berechnungen über das Betriebsverhalten von Maschinen aufgezeigt. Fragen der Optimierung und Probleme der Programmierung nehmen einen breiten Raum ein. Viele durchgerechnete Beispiele mit den notwendigen Flußbildern erleichtern das Einarbeiten in dieses spezielle Gebiet. Entwicklungsingenieure, Konstrukteure und Programmierer finden in diesem Buch wertvolle Anregungen für eine erfolgreiche Zusammenarbeit.

VEM-Handbuch

Die Technik der elektrischen Antriebe

Grundlagen

Autorenkollektiv

6., durchgesehene Auflage 1976. Format 14,7 cm × 21,5 cm, 598 Seiten, 505 Bilder, 65 Tafeln, Kunstleder, 27,50 Mark

Mit der 5. Auflage dieses VEM-Handbuchs wurde wichtigen neuen Erkenntnissen und den umfangreichen Neu- und Weiterentwicklungen auf dem Gebiet der elektrischen Antriebe Rechnung getragen. Die Bearbeitung erfolgte durch ein Kollektiv erfahrener Wissenschaftler und Hochschullehrer unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. habil. *R. Schönfeld.* Dabei wurde eine systematische Neugliederung des Stoffs auf der Grundlage einer modernen fachwissenschaftlichen Betrachtungsweise vorgenommen.

Einführend werden Definitionen, Aufgaben, technische Forderungen, Konstruktionsformen, Eigenschaften, die Systemelemente und die Mechanik der elektrischen Antriebe behandelt. Es folgen die Funktionseinheiten der elektromechanischen Energiewandlung unter besonderer Berücksichtigung der Schaltungstechnik, die Wirkungsweise und das Betriebsverhalten. Im Abschnitt 3. werden die Motorauswahl, die Dimensionierung sowie der Motorschutz beschrieben und Erwärmungsprobleme und deren Auswirkungen in Verbindung mit Isolierstoffragen erläutert.

Dem Gesamtkomplex der Leistungselektronik für die Antriebstechnik ist der 4. Abschnitt gewidmet. Ausgehend von der Wirkungsweise der typischen Halbleiter werden die Kennwerte und Eigenschaften angegeben und Schaltungen und Betriebseigenschaften der Stromrichter mit Netz- und Selbstlöschung betrachtet. Anschließend werden ausführlich regelungs- und steuerungstechnische Fragen beantwortet.

Sowohl praktisch tätige Ingenieure der Elektrotechnik, der Automatisierungstechnik und des Maschinenbaus als auch Studenten an Hoch- und Fachschulen finden in diesem Buch wertvolle Anregungen und Hinweise für die von ihnen zu lösenden Aufgaben auf dem Gebiet der elektrischen Antriebe.

ELEKTROINDUSTRIE DER DDR

VEM

Handbuch Numerische Steuerungen

Bartsch

VEM-Handbuch Numerische Steuerungen

DR.-ING. HANS-JOCHEN BARTSCH

VEM-Handbuch Numerische Steuerungen

Herausgeber:
Institut für Elektro-Anlagen (IEA)
Wissenschaftlich-Technisches Zentrum
der VVB Automatisierungs-
und Elektroenergie-Anlagen

Mit 254 Bildern und 12 Tafeln

VEB VERLAG TECHNIK BERLIN

1. Auflage
© VEB Verlag Technik, Berlin, 1976
Lizenz 201.370/62/76
DK 62-523.8:681.32.06:621.7/.9 · LSV 3515 · VT 3/5170-1
Lektor: Ing. *Inge Epp*
Schutzumschlag: *Kurt Beckert*
Printed in the German Democratic Republic
Satz und Druck: VEB Buchdruckerei Borsdorf, 7122 Borsdorf, III-18-328
Buchbinderische Weiterverarbeitung: Nationales Druckhaus Leipzig
Redaktionsschluß: Juli 1974
Bestellnummer: 552 362 2
DDR 25,00 M

VORWORT

Das notwendige Wachstum des Automatisierungsgrades in allen Zweigen der materiellen Produktion fordert einen sich ständig erweiternden Einsatz der Prozeßrechentechnik. Während anfangs vor allem der kontinuierlich verlaufende Prozeß rechentechnisch erfaßt, gesteuert und geregelt wurde, erweitert die numerische Steuerung den Einsatz der Rechentechnik auch zu diskontinuierlichen Prozessen. Mit der numerischen Steuerung wird in Verbindung mit einer der Werkstattumgebung angepaßten Meßtechnik vor allem der Be- und Verarbeitungsmaschinenindustrie ein hervorragendes Rationalisierungsmittel zur Verfügung gestellt. Damit erfährt die Intensivierung der Volkswirtschaft einen entscheidenden, den Bedingungen der sozialistischen erweiterten Reproduktion entsprechenden Beitrag, der die sozialistische ökonomische Integration auf dem Gebiet des Maschinenbaus umfassend fördert.

Aufgabe dieses Buches ist es, sowohl dem Automatisierungstechniker, Technologen und Konstrukteur als auch dem Studierenden dieser Fachrichtung die numerische Steuerung mit ihren peripheren Gebieten so nahezubringen, daß deren Inhalt und Aufgabe erkannt und die mögliche Einsatzbreite ausgeschöpft wird.

Das Gebiet wird vom Blickwinkel der Automatisierungs- und Steuerungstechnik aus betrachtet, wobei eine einseitige Orientierung im Gesamtumfang auf die „numerisch gesteuerte Werkzeugmaschine" absichtlich vermieden wird. Dazu wird neben den mathematischen Grundlagen auch ein Einblick in die mit elektronischen integrierten Schaltkreisen aufgebaute numerische Steuerungstechnik gegeben, aus dem sich Parallelen zu ähnlichen Aufgaben ableiten lassen.

Wenn es gelungen ist, mit dieser Erweiterung der VEM-Handbuchreihe den Zusammenhang zwischen Steuerungs- und Prozeßrechentechnik so aufzuzeigen, daß die konventionelle Steuerung über die numerische Steuerung hierarchisch zur umfassenden Prozeßrechentechnik führt, dann ist das Anliegen erfüllt.

An dieser Stelle möchte ich den Herren Dr.-Ing. *A. Russig* von der Technischen Hochschule Karl-Marx-Stadt sowie Dipl.-Ing. *R. Wätzig* vom Forschungszentrum des Werkzeugmaschinenbaues Karl-Marx-Stadt für die wertvollen Hinweise bei der Begutachtung danken. Gleichzeitig danke ich den Herren Prof. Dr. sc. techn. *Budig*, Prof. Dr.-Ing. habil. *Habiger* und Prof. Dr.-Ing. *Tschink* für ihre Anregungen bei der Ausarbeitung des Buches.

Besonderer Dank gilt auch den Mitarbeitern des Verlags für die Unterstützung des Vorhabens.

Karl-Marx-Stadt, im Juli 1974

Hans-Jochen Bartsch

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung 13
1.1. Gesellschaftliche Stellung der Numerik 13
1.2. Definition der numerischen Steuerung (NC) 13
1.3. Direkte und indirekte Vorteile beim Einsatz von NC 16
1.4. Einsatzbreite der NC 17

2. Grundlagen 19
2.1. Kybernetische Grundbegriffe 19
2.2. Wirkprinzipien für NC 23
2.3. Steuerungsarten, Einteilungsmerkmale 24
2.4. Mathematische Grundlagen 27
2.4.1. Zahlendarstellung, Konvertierung 27
2.4.2. Arithmetische Grundoperationen an Binärziffern 32
2.4.2.1. Addition von drei Binärziffern (Volladder) 32
2.4.2.2. Subtraktion von zwei Binärziffern von einer dritten (Subtraktor) 33
2.4.3. Negative Zahlen 34
2.4.4. Grundrechenarten mit Dualzahlen 35
2.4.4.1. Addition relativer Dualzahlen in Komplementdarstellung . . 35
2.4.4.2. Multiplikation von Dualzahlen 37
2.4.4.3. Division von Dualzahlen 38
2.4.5. Grundrechenarten mit BCD-Zahlen 38
2.4.5.1. 6-Korrektur 38
2.4.5.2. Addition relativer BCD-Zahlen mittels 10-Komplements . . 39
2.4.5.3. Addition relativer BCD-Zahlen mittels 16-Komplements . . 39
2.4.5.4. Multiplikation von BCD-Zahlen 41
2.5. Interpolationsverfahren 41
2.5.1. Allgemeines 41
2.5.2. DDA-Verfahren 42
2.5.2.1. Geradeninterpolation DDA 43
2.5.2.2. Kreisinterpolation DDA 45
2.5.3. Verfahren direkter Funktionsberechnung (Such-Schritt-Verfahren) 48
2.5.3.1. Geradeninterpolation, direkte Funktionsberechnung 49
2.5.3.2. Kreisinterpolation, direkte Funktionsberechnung 51
2.5.4. Analog-Interpolation 58
2.6. Codierung der Eingangsinformationen 58
2.6.1. Allgemeines 58
2.6.2. ISO-7-bit-Code 60
2.6.3. EIA-Code 60
2.6.4. Programmaufbau 60
2.6.5. Interpolation 61

2.6.6. Zusatzfunktionen (M) 67
2.6.7. Wegbedingungen (G) 72
2.6.8. Vorschübe und Drehzahlen 72
2.6.9. Achsen und Bewegungsrichtung 74

3. Weg- und Winkelmessung 75
3.1. Allgemeines 75
3.2. Digitale Meßverfahren 79
3.2.1. Inkrementale Geber 79
3.2.2. Digital-absolute Geber 86
3.3. Analoge Meßverfahren 89
3.3.1. Drehmelder 89
3.3.2. Inductosyn 90

4. Integrierte Schaltungen, Kartenbaugruppen, Einsatzbedingungen 93
4.1. Integrierte Schaltkreise 93
4.1.1. Allgemeines 93
4.1.2. NAND-Technik 95
4.1.3. DDR-Baureihe D 10 96
4.1.3.1. Systemparameter 96
4.1.3.2. Typenübersicht der TTL-Standardbaureihe 99
4.1.3.3. Erläuterungen zu den digitalen Schaltkreisen 101
4.1.3.4. Zusammenschaltbedingungen 106
4.1.4. Analoge Schaltkreise 107
4.2. Ergänzungsschaltungen 110
4.3. Störsicherheit 110
4.3.1. Allgemeines 110
4.3.2. Störungen durch Signalumschaltung 111
4.3.3. Reflexionen 113
4.3.4. Kopplungen 114
4.4. Konstruktive und technologische Festlegungen 118

5. Innere Datenverarbeitung in festverdrahteten Steuerungen 121
5.1. Blockschaltbilder von numerischen Anzeigen und Steuerungen 121
5.1.1. Allgemeines 121
5.1.2. Numerische Positionsanzeigen 121
5.1.3. Sollwerteingabe 124
5.1.4. Punkt-Strecken-Steuerungen 124
5.1.5. Bahnsteuerungen 130
5.2. Funktionseinheiten für Programmeingabe und -speicherung 133
5.2.1. Ablauffunktionen der Eingabe 133
5.2.1.1. Eingabeablaufsteuerung 133
5.2.1.2. Verteiler, Adressenspeicher, Zwischenspeicher 138
5.2.1.3. Betriebsartenwahl 140
5.2.2. Handeingabe 142
5.2.2.1. Tastersynchronisation 142
5.2.2.2. Vorwahlschalter 143
5.2.2.3. Handeingabe von Programmsätzen 146
5.2.3. Lesereingabe 147
5.2.3.1. Lochstreifenleser 147

5.2.3.2. Leseransteuerung 149
5.2.3.3. Zeichen- und Paritätsprüfung; Zeichenentschlüsselung . . . 150
5.2.3.4. Satzsuchlauf 154
5.2.4. On-line-Eingabe 155
5.2.5. Sollwertspeicherung, innere Abläufe 155
5.2.5.1. Register als Speicher 155
5.2.5.2. Zusatzfunktionen (M-Befehle) 156
5.2.5.3. Wegbedingungen G (Ablaufwählfunktion G beim EIA-Code) 156
5.2.5.4. Kettenmaß 156
5.2.5.5. Korrekturwertverarbeitung 157
5.3. Funktionseinheiten für Istwerterfassung und -entschlüsselung 157
5.3.1. Funktionseinheiten für inkrementale Geber 157
5.3.1.1. Eingangsschaltung 157
5.3.1.2. Richtungsdiskriminator 158
5.3.1.3. Nullimpulsauswertung 158
5.3.2. Funktionseinheiten für absolute Geber WMS 10^6 spv 161
5.3.3. Funktionseinheiten für Inductosyn und Resolver 161
5.4. Funktionseinheiten zur Informationsübertragung 163
5.4.1. Datennahübertragung 163
5.4.2. Datenfernübertragung 165
5.5. Funktionseinheiten zur Taktversorgung 165
5.5.1. Synchrone Arbeitsweise 165
5.5.2. Taktversorgung, unstabilisiert 166
5.5.3. Taktversorgung, quarzstabilisiert 168
5.6. Funktionseinheiten für inkrementale innere Datenverarbeitung, Positionierfunktionen 169
5.6.1. Korrekturimpulseinblendung 169
5.6.2. Nulldurchgangslogik 170
5.6.3. BCD-Zähler 172
5.6.4. Vorabschaltung, Koinzidenz 175
5.7. Funktionseinheiten für absolute innere Datenverarbeitung, Positionierfunktionen 177
5.7.1. Steuerwerk 177
5.7.2. Rechenwerk 180
5.7.3. Vorschubgeschwindigkeit, Nebenkoinzidenz 184
5.7.4. Festwert- und Korrekturwertverarbeitung (Unterprogramme G 45 bis G 59) 186
5.7.5. Weitere Unterprogramme 186
5.7.5.1. Programmierbare Verweilzeit (G 04) 186
5.7.5.2. Grobbearbeitung (G 61), Grobpositionieren (G 62) 186
5.7.5.3. Tischumschlagbearbeitung (G 69) 186
5.7.5.4. Feste Zyklen (G 81 bis G 89) 189
5.7.6. Löschimpulsbildung 190
5.7.7. Anschluß inkrementaler Geber an die absolute Steuerung . . 191
5.8. Funktionseinheiten für spezielle Bahnsteuerungsfunktionen 192
5.8.1. Steuerwerk 192
5.8.2. Interpolator 193
5.8.2.1. Allgemeines 193
5.8.2.2. Interpolator für direkte Funktionsberechnung 195

5.8.2.3. DDA-Interpolator 201
5.8.2.4. Analog-parabolischer Interpolator 202
5.8.3. Koordinatenrechner 203
5.8.3.1. Zwischenspeicherung der Eingabedaten 203
5.8.3.2. Werkzeugkorrektur 204
5.8.3.3. Umrechnung von Bezugs- auf Kettenmaß 209
5.8.3.4. Nullpunkttransformation 210
5.8.3.5. Tischumschlagbearbeitung 210
5.8.3.6. Gewindeschneiden mit Interpolator 210
5.8.3.7. Feste Zyklen 212
5.8.3.8. Koordinatenrechenwerk 213
5.8.4. Geschwindigkeitssteuerung 217
5.8.4.1. Geometrische Stufung 217
5.8.4.2. Direkte Vorschubprogrammierung 218
5.8.4.3. Abwandlung zur Streckensteuerung NC 430 mit Bahncharakter 219
5.8.4.4. Konstante Vorschubgeschwindigkeit 221
5.8.5. Digitaler Vergleicher 224
5.9. Funktionseinheiten zur Informationsausgabe 224
5.9.1. Optische Anzeigen 224
5.9.2. Befehlsausgabe 226
5.9.3. DA-Wandler 229

6. Funktionseinheiten zur Ansteuerung von Stellgliedern 231

6.1. Anpassung 231
6.1.1. Allgemeines 231
6.1.2. Funktionseinheiten 232
6.1.2.1. Grundeinheit 232
6.1.2.2. M-Speicher 232
6.1.2.3. Achssteuerungen 234
6.1.2.4. Digitale Vorschübe 234
6.1.2.5. Drehzahlen 234
6.1.2.6. Werkzeugwechsel 235
6.1.3. Freiprogrammierbare Anpaßsteuerung 236
6.2. Antriebe 239
6.2.1. Grundlagen 239
6.2.2. Hauptantriebe 244
6.2.3. Vorschubantriebe 246
6.2.3.1. Gleichstrom-Vorschubantrieb 246
6.2.3.2. Gleichstrom-Stellmotoren 252
6.2.3.3. Elektrohydraulischer Antrieb 253
6.2.3.4. Schrittantrieb 254
6.2.4. Abschaltkreis, Lageregelkreis 259
6.2.4.1. Abschaltkreis 259
6.2.4.2. Lageregelkreis 260
6.3. Starkstromteil 266

7. Konstruktion, Technologie 267

7.1. Stromversorgung 267
7.2. Konstruktiver Aufbau 270

8. Prüfung, Inbetriebnahme, Service, Zuverlässigkeit 275
8.1. Prüfung, Fehlerortung 275
8.2. Inbetriebnahme, Wartung, Service 280
8.3. Zuverlässigkeit 281
8.3.1. Allgemeines 281
8.3.2. Begriffe 281
8.3.3. Wahrscheinlichkeitstheoretische Grundlagen 282
8.3.4. Zuverlässigkeit ausgeführter NC 286

9. Adaptive Regelung 288
9.1. Allgemeines 288
9.2. Auslastungsregelung (ACC) 290
9.3. Optimierungsregelung (ACO) 292

10. Steuerungshierarchie, Rechnereinsatz 295
10.1. Steuerungshierarchie 295
10.2. Prozeßebene 297
10.3. Steuerebene 297
10.4. Datenverwaltung und Fertigungssteuerebene 300
10.5. Betriebsleitebene 303

11. Programmierung 304
11.1. Manuelle Programmierung 304
11.2. Maschinelle Programmierung 307
11.2.1. Einführung 307
11.2.2. Ablauf der maschinellen Programmierung 308
11.2.3. AUTOTECH/SYMAP 309
11.2.3.1. Allgemeine Charakteristik 309
11.2.3.2. Programmiersprache SYMAP 310
11.2.3.3. Komplexprogramme für Mittel- und Großrechner 311
11.2.3.4. Komplexprogramme für Kleinrechner 312
11.2.4. Entwicklungstendenzen in der maschinellen Programmierung 313

12. Ausblick 315

13. Anhang 318
13.1. Formelzeichen und Abkürzungen 318
13.2. Standards 322

14. Literaturverzeichnis 326

15. Sachwörterverzeichnis 339

1. EINLEITUNG

1.1. Gesellschaftliche Stellung der Numerik

Die Volkswirtschaft stellt in allen sozialistischen Staaten die materielle Basis zur Erfüllung des ökonomischen Grundgesetzes des Sozialismus, der Hauptaufgabe zur immer besseren Befriedigung der ständig wachsenden materiellen und geistig-kulturellen Bedürfnisse der Gesellschaft dar. Dazu wenden die Werktätigen bewußt die neuesten Erkenntnisse aus Wissenschaft und Technik an. Der Hauptweg zur Erhöhung der Effektivität der Produktion ist deren Intensivierung unter sozialistischen Produktionsverhältnissen.

Intensivierung heißt, mit der gleichen Anzahl Arbeitskräfte wesentlich mehr zu produzieren. Dazu dient der Erfinderdrang, der Mut zum Neuen vieler schöpferisch tätiger Menschen, die zur Mechanisierung, Rekonstruktion, Modernisierung und Gestaltung sozialistischer Arbeits- und Lebensbedingungen beitragen.

Die im folgenden zu behandelnden numerischen Steuerungen (NC) sind als hervorragendes Rationalisierungsmittel Teil dieser Aufgabe. Sie fordern das Vermögen der Maschine weitgehend ab, so daß bei einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine (NCM) der Ausnutzungsgrad auf 65 bis 85% gegenüber konventionellen Werkzeugmaschinen mit nur 25 bis 30% steigt.

Numerische Steuerungen können Teil einer hierarchischen Automatisierungsanlage sein, mit der immer bessere Leitung, Planung und Durchführung der Produktion (integrierte Datenverarbeitung) der Zukunft und ein schrittweiser Übergang zu höheren Produktionsformen erreichbar ist.

Auch in den nächsten Jahren wird der (Werkzeug-)Maschinenbau Hauptanwender der numerischen Steuerung sein, somit der Industriezweig, der hochproduktive Rationalisierungsmittel für die gesamte Wirtschaft liefert. In seinem Verlangen nach flexiblen Programm- und Prozeßsteuerungen für Einzelmaschinen und verketteten Maschinensystemen gemäß seiner volkswirtschaftlichen Aufgabe liegt das gesellschaftliche Bedürfnis für die Numerik.

Die Bedeutung der NC liegt in der Automatisierung der Einzel- und Kleinserienfertigung, deren Anteil am Gesamtvolumen – trotz sinkender Tendenz – auf der Basis Maschinenstunden nach wie vor überwiegt und von dem der größte Teil noch auf nicht automatisierten Werkzeugmaschinen bearbeitet wird. Je durchgängiger und flexibler die Automatisierung betrieben wird, um so größere Erfolge sind zu erwarten. Dabei sei jedoch nicht verschwiegen, daß der Automatisierung großer Fertigungseinheiten (großer Systeme) aus Rentabilitäts-, Programmierungs- und Verfügbarkeitsgründen Grenzen gesetzt sind.

1.2. Definition der numerischen Steuerung (NC)

Der Beginn der numerischen Steuerungstechnik reicht in die Jahre 1948/50 zurück [1.1], als mit ihr komplizierte dreidimensionale Werkstücke, deren Konturen nur mit mathematischen Beziehungen beschreibbar sind, der materiellen

Produktion überhaupt erst zugänglich wurden [1.2]. Luft- und Raumfahrt waren damals die Anwendungsgebiete, von denen auch das „Massachusetts Institute of Technology" (Cambridge, USA) 1948 den Auftrag über die Entwicklung einer „zifferngesteuerten Werkzeugmaschine" erhielt. Bald setzte sich die Erkenntnis durch, daß mit Hilfe der elektronischen Datenverarbeitung die Rationalisierung der Einzel-, Klein- und auch der Mittelserienfertigung – bei steigenden Genauigkeitsforderungen – durch Senkung der Haupt- und Nebenzeiten erfolgen kann, und die NC erschloß sich breite Anwendung. Während die Prozeßrechentechnik – und um einen Spezialprozeßrechner handelt es sich bei NC – vordem fast ausschließlich dem kontinuierlichen Prozeß diente, erweiterte die Numerik ihre Anwendung auf diskontinuierliche (Stück-, Chargen-)Prozesse. Heute ist sie zu einem Gradmesser des techn'schen Vermögens des Werkzeugmaschinenbaus geworden.

Definition

Eine numerische Steuerung ist ein (meist elektronisch arbeitender) zeichenverstehender Automat. Als Zeichen werden angeboten:

- Maßzahlen für die Beschreibung der Geometrie
- Adreßbuchstaben für die Auswahl der Achsen und Befehle
- Kennzahlen für das Einbringen codierter Informationen.

Die Informationen werden rechnend oder zählend im Echtzeitbetrieb verarbeitet, sie enthalten alle für einen automatischen Betrieb notwendigen geometrischen und technologischen Daten. Als wichtiges Unterscheidungsmerkmal gegenüber anderen Prozeßrechnern liegt die Messung geometrischer Daten (Wege, Winkel, Wagenausschlag u.ä.) vor.

Aus dem Anglizismus „numerical control" (numerische Steuerung) hat sich die Abkürzung „NC" eingebürgert, die numerisch gesteuerte Maschine heißt „NCM".

Weiter ist eine Steuerung in der Kybernetik wie folgt definiert [1.3]:

„Steuerung ist die zielgerichtete Einwirkung auf ein Objekt, wobei die Einwirkung aus einer Menge möglicher Einwirkungen entsprechend bereits vorliegender Information so ausgewählt wird, daß sie die Arbeitsweise ... des jeweiligen Objektes verbessert."

Diese Verbesserung liegt bei NC im Umschlag vom wahllosen zum zielgerichteten Arbeiten vor.

Während anfänglich NC nur in festverdrahteter Ausführung existierte, eröffnen Preissenkungen dem Kleinrechner die Möglichkeit, als Kernstück einer NC zu fungieren (CNC, s. Abschn. 10.).

Das Modell des Gesamtsystems numerisch gesteuerter Fertigungsprozesse zeigt Bild 1.1 [1.4]. Die NC hebt sich von der herkömmlichen Steuerungstechnik wesentlich durch die selbständige Messung der absoluten oder relativen Lage des Werkstücks ab. Im Verlegen der Werkstückgeometrie vom Nocken bzw. der visuellen Lagekontrolle in ein flexibles alpha-numerisches Programm begründet sich der qualitative Sprung.

In [1.5] [1.6] wurden die Steuerungsaufgaben für Stückprozesse im Hinblick auf den Einsatz in verketteten Maschinensystemen für folgende Teilgebiete dargestellt:

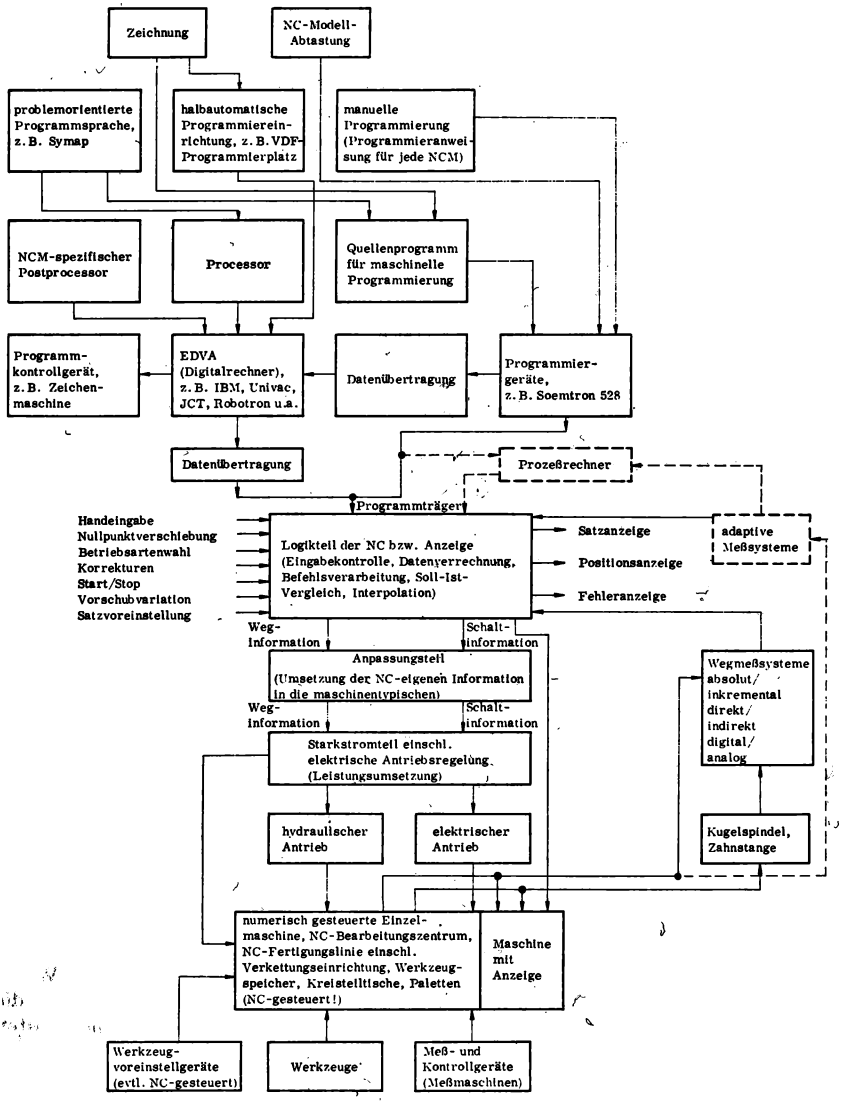


Bild 1.1. Modell des Gesamtsystems numerisch gesteuerter Fertigungsprozesse

- Bearbeitungssystem mit Zuführen, Spannen, Entfernen von Werkstück und Werkzeug
  Positionieren von Werkstück bzw. Werkzeug
  Speichern von Werkzeugen
  Auswahl von Geschwindigkeiten und Vorschüben
  Steuern der Arbeitsbewegungen der Maschinenelemente in vorgegebener Reihenfolge
- Transportsystem für Werkstück und Werkzeug einschließlich deren Auswahl und Erkennung
- Meßsystem für Positionierung und Prüfung mit Bewertung einschließlich Auslösen von Korrekturen
- Hilfssystem für Kühlung, Waschen
- Informationssystem zur Lösung der Steuerungsaufgaben.

Durch die steigende Kompliziertheit der Ausrüstung tritt bei NC neben der Qualität der Vorbereitung der Produktion die Zuverlässigkeit der Ausrüstung in den Vordergrund; denn die Steuerung führt kritiklos alle vermeintlich richtigen Aufgaben aus.

1.3. Direkte und indirekte Vorteile beim Einsatz von NC

Mit dem Einsatz numerischer Steuerungen erreicht man folgende direkte Vorteile:

- Steigerung der Arbeitsproduktivität, Mehrmaschinenbedienung durch Automatisierung auch bei kleinen Losgrößen
- Erhöhung des Maschinenausnutzungsgrades
- Einsparung von Vorrichtungen, Modellen (konventionelle Formspeicher) und Lehren
- Senkung von Umlaufmitteln
- Senkung der Durchlaufzeiten
- Erhöhung der Genauigkeit, leichtere Endmontage
- Senkung des Ausschusses durch Vermeidung von Eingabefehlern
- Gleichmäßigkeit der Produkte durch Ausschaltung subjektiver, physischer und psychischer Momente, gleichbleibende Bearbeitungsgüte
- Senkung der Meß- und Kontrollzeiten
- Senkung der Lieferfristen
- schnelle Herstellung von Ersatzteilen.

Voraussetzung für die Wirksamkeit aller Faktoren ist ein langfristig vorbereiteter Einsatz der NC, wobei die Qualifikation der Mitarbeiter entscheidend bleibt. Während sich die direkten Vorteile unmittelbar in den Kosten je Werkstück niederschlagen, beeinflussen die ebenso wichtigen indirekten Vorteile die Gesamtökonomie des Betriebes als Stimulus für die Senkung der Gemeinkosten und Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit. Diese sind

- Zwang zu Ordnung und technologischer Disziplin
- Standardisierung des Werkzeugsortiments und deren Voreinstellung
- Standardisierung des Teilesortiments

- schnellere und einfache Änderung des Programms gegenüber Modelländerung
- Verlagerung eines Zeitanteils aus der Produktion in die Vorbereitung
- Einsparung von Lagerraum für Roh-, Halbfertig- und Ersatzteile
- verkürzte Überleitungszeit von Forschungsergebnissen in die Produktion durch Wegfall von Vorrichtungen
- Minderung des ständigen Mangels an Vorrichtungsbaukapazität
- Erhöhung der Flexibilität, rasche Anpassung an Marktbedingungen
- Verbesserung der Normativarbeit, neue Lohnformen
- Speicherung der technologischen Anweisungen, Erfahrungen und geometrischen Formen in einfachen, leicht zu archivierenden Datenträgern.

Die Gesamtökonomie einer NCM ist bei der Einsatzplanung gründlich zu betrachten, da der erheblich höhere Maschinenstundensatz gegenüber herkömmlicher Fertigungstechnik mehrschichtige Auslastung und ein entsprechendes Werkstücksortiment verlangt.

1.4. Einsatzbreite der NC

Aus z.T. einander widersprechenden Angaben stellt sich die Entwicklung des Einsatzes in den USA nach [1.1] [1.7] bis [1.11] etwa so dar:

1952	1 NCM
1960	400 NCM
1965	7000 NCM
1968	14260 NCM
1969	15000 NCM
1972/73	21000 NCM

(Das entspricht 1973 etwa 1 % der eingesetzten Werkzeugmaschinen.)

Die Entwicklung der Produktion (!) in der UdSSR verlief nach [1.12]:

1965		42 NCM
1970	mehr als	1100 NCM
1972		3038 NCM
1975	etwa	4500 NCM

(Das entspricht 1975 etwa 2,2 % der produzierten Werkzeugmaschinen.)

Interessant ist der einseitige Einsatz nach [1.8] der oben angeführten 14260 NCM:

96 % spanende Werkzeugmaschinen
3 % Stanzen, Formmaschinen
1 % Brennschneidemaschinen, Punktschweißmaschinen, Meßmaschinen u. a.

[1.9] entnimmt man die Werkstückanalysen gemäß Tafel 1.1, aus der sich der vordringliche Einsatz von NCM in den Fällen ableitet, in denen das Verhältnis anteiliger Fertigungszeit zu anteiliger Stückzahl hoch ist.

Von *Opitz* und *Winkler* [1.13] wird der Sättigungsgrad für NCM mit 10 bis 15 % des gesamten Werkzeugmaschinenparks prognostiziert. Bedenkt man den 1975

Tafel 1.1. Werkstückanalyse [1.9]

Prozentualer Anteil der Teilearten im Maschinenbau

Teilart	Stückzahlen	Fertigungszeitaufwand			
Rundteile	55%	32%			
Prismatische Teile	18%	58%	kubische Teile	7%	50%
Figurelle Teile	7%	5%	flache Teile	11%	8%
Blechteile	20%	5%			

Prozentualer Anteil der Abmessungen der kubischen Teile

Abmessungen $B \times H \times L$	Stückzahlen	Fertigungszeitaufwand
$\leqq 400 \leqq 400 \leqq 400$	60%	30%
$\leqq 800 \leqq 1000 \leqq 1000$	20%	40%
$\leqq 2500 \leqq 2500 \leqq 2500$	20%	30%

erreichten Stand von $< 2\%$, wird die Aufgabe für die Automatisierungstechnik deutlich. Für den heute noch schleppenden Einsatz werden ökonomische und betriebsorganisatorische Gründe genannt.

Der vorwiegende Einsatz an spanabhebenden Werkzeugmaschinen liegt in der seit jeher progressiven Einstellung dieses Industriezweigs und dem hohen Zeitanteil von Einzel- und Kleinserienfertigung auf Werkzeugmaschinen. Da mit NC alle Prozesse gesteuert werden können, deren Geometrie durch Lage-, Weg- oder Winkelmessung erfaßt wird, bieten sich weitere Einsatzfälle an:

- Textilindustrie (Musterfertigung, Zuschneiden)
- Brennschneid- und Schweißtechnik
- Zeichenmaschinen
- Meßmaschinen
- Prüfmaschinen und -stände
- Chargierung, Wägeprozesse
- Bauwesen (Betonteilefertigung)
- Transport- und Lagerwesen
- Schmiederei, Härterei
- Umformtechnik, wie Pressen, Drücken, Stanzen, Nibbeln u.ä.
- Ablängen von Material
- Förder- und Beschichtungsprozesse
- Sortierung
- Verdrahtungstechnik
- Montageprozesse (auch bei Massenfertigung).

2. GRUNDLAGEN

2.1. Kybernetische Grundbegriffe

Die Kybernetik definiert den technischen Automaten [2.1] als ein System von Mechanismen und Anlagen, in denen die Vorgänge bei der Aufnahme, Umwandlung, Weitergabe und Ausnutzung von Energie, Stoffen und Informationen zur Aufrechterhaltung seiner Tätigkeit ohne unmittelbare Beteiligung des Menschen ablaufen.

NC sind informations- (nur bei Lüftung und Stromversorgung energie-)verarbeitende, sequentielle Automaten, d.h. solche mit Speichervermögen. Die allgemeine Automatendarstellung [2.2] (Bild 2.1) wird zum speziellen Modell der NC (Bild 2.2), wenn man diesem als Schwarzer Kasten (englisch black box) die realen Eingangs- und Ausgangsgrößen zuordnet, wobei

- Eingangsgrößen alle Informationen des Programms (automatisch oder von Hand), Rückinformationen aus dem Prozeß und Störgrößen
- Ausgangsgrößen alle Informationen an den Prozeß bzw. als optische oder akustische Signale zur Darstellung von inneren Zuständen des Gesamtsystems sind.

Einige Eingangsinformationen beeinflussen nur die inneren Zustände z_i.

Löst man das Modell in Funktionsblöcke auf, ergibt sich zur ersten Grobübersicht Bild 2.3.

Eingangs- und Ausgangsgrößen sind durch mehrere Steueralgorithmen mathematisch verknüpft, d.h. mit Vorschriften zur Überführung von Anfangsdaten in das gesuchte Ergebnis mittels Operationsfolgen. Von *Kämmerer* [2.3] werden die wesentlichen Forderungen an einen Algorithmus erläutert, die bei den Steueralgorithmen einer NC eingehalten sind:

- Er muß eindeutig sein, keine Eingriffe zulassen bzw. voraussetzen (Determiniertheit).
- Er muß mindestens einen Parameter enthalten, der in einem bestimmten Bereich unterschiedlich belegt sein kann (Anwendungsbreite).
- Er muß in einer endlichen Anzahl Schritte zum gewünschten Ergebnis führen (Effektivität).

Zum Verständnis der NC als informationsverarbeitendes System sind noch einige informationstheoretische Begriffe einzuführen [2.1] bis [2.7].

Mit Bit bezeichnet man eine Stelle eines Binärcodewortes, während bit (englisch binary digit) die Einheit für die Informationsmenge (den Informationsgehalt) einer Nachricht ist. Es kennzeichnet die Auswahlentscheidung zwischen zwei gleichwahrscheinlichen, einander ausschließenden Zuständen: ja – nein, ein – aus, wahr – falsch, L — 0 und läßt sich auf technische Mechanismen leicht projizieren. Durch Zuordnung einer physikalischen Größe (Länge, Winkel) auf die kleinste Einheit (Bitgröße) liegt die elektronische Genauigkeit fest, die bei

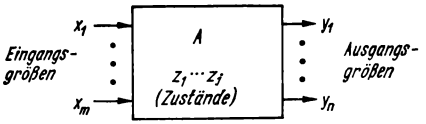


Bild 2.1. Diskreter Automat

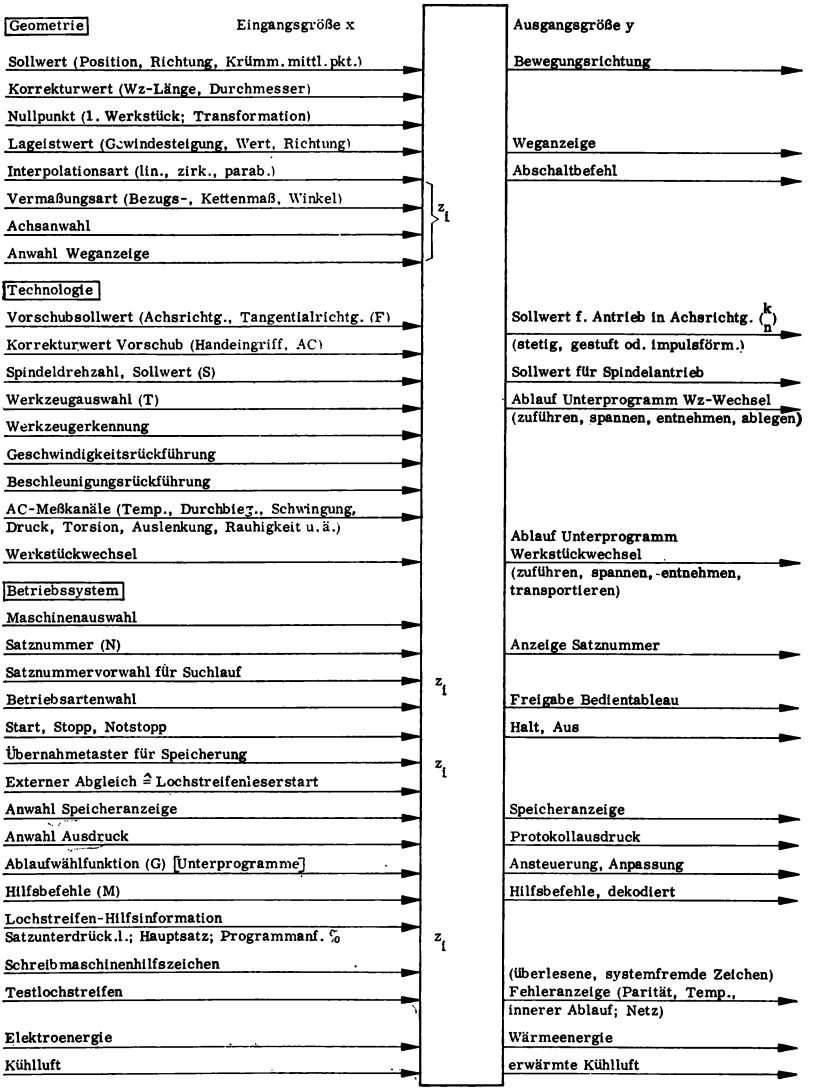


Bild 2.2. Modell NC

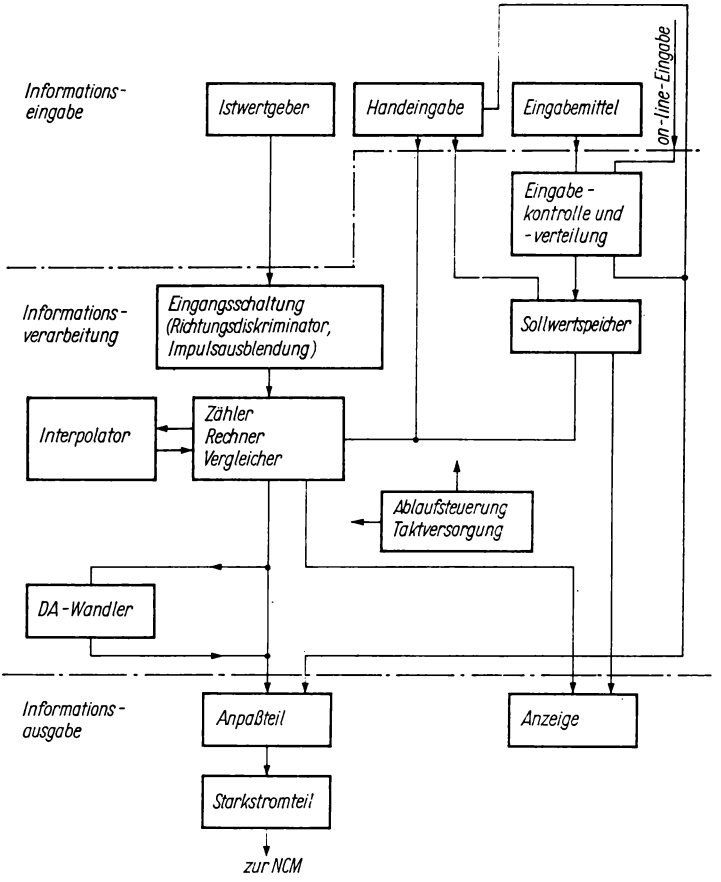


Bild 2.3. Funktionsblöcke einer NC

digitaler Verarbeitung nicht unterschritten werden kann und den unvermeidbaren Digitalisierungsfehler ergibt. Der maximale Informationsgehalt (Entscheidungsgehalt) eines Vorrates x ist

$$H_0(x) = H_{\max}(x) = \log_2 n = \mathrm{ld}\, n \text{ in bit} = 3{,}3 \lg n;$$

n Anzahl der Möglichkeiten.

Der Informationsgehalt ist am größten ($H_{\max}$), wenn alle möglichen Ergebnisse gleichwahrscheinlich $p(x_i) = \frac{1}{n}$ sind. Sind diese unterschiedlich [$p(x_i) < 1$ und ungleich], so lautet der mittlere Informationsgehalt (Entropie)

$$H = \sum_{i=1}^{i=n} p(x_i)\, \mathrm{ld}\, \frac{1}{p(x_i)} \text{ in bit (Shannon)}.$$

Er gibt die Informationsmenge an, die man im Mittel zur Kennzeichnung eines Zustands aus einer Gesamtmenge benötigt.

Liegt absolute Sicherheit eines Ereignisses vor [$p(x_i) = 1$], wird keine neue Information übermittelt ($H = 0$).

Redundanz: $R = H_0(x) - H(x)$.

Als Zusatzliteratur wird [2.5] empfohlen.

Beispiel: Tetrade ($n = 16$)

$$H = \sum_{1}^{10} 0{,}1 \operatorname{ld} 10 = 1 \operatorname{ld} 10 = 3{,}32 \text{ bit} \qquad p(x_i) = \frac{1}{10}$$

für $i = 1 \cdots 10$

$p(x_i) = 0$

für $i = 11 \cdots 16$

$H_0 = \operatorname{ld} 16 = 4$ bit

$R = H_0 - H = 4 - 3{,}32 = 0{,}68$ bit; das entspricht etwa 20% von 3,32, die nicht genutzt werden.

Nach TGL 14591 heißt „eine von einer physikalischen Größe getragene Zeitfunktion ein Signal, wenn diese Zeitfunktion einen Parameter besitzt, der den Werteverlauf einer technischen oder physikalischen Größe, die signalisierte Größe genannt wird, abbildet. ... Der Parameter des Signals, auf den der Werteverlauf der signalisierten Größe abgebildet wird, heißt Informationsparameter."

Eine Nachricht ist eine Mitteilung über den Zustand z^t eines Systems zum Zeitpunkt t_i.

Unter binär wollen wir Signale verstehen, deren Informationsparameter zwei einander ausschließende bedeutungsvolle Zustände annehmen kann, zwischen denen ein indifferenter Bereich liegt. Dagegen sei mit dual ein Zahlensystem gekennzeichnet, dessen Stellenwertigkeiten Potenzen von 2 sind. Oft wird zwischen beiden nicht exakt unterschieden.

Binäre Signale sind eine Untermenge der diskreten Signale, bei denen die Informationsparameter quantisiert sind und die ihren Wert beibehalten, wenn die abgebildete physikalische Größe im zugehörigen Wertebereich verbleibt.

Bei der Informationsverarbeitung treten Wechsel zwischen diesen Werten auf, wobei ein Zustand zu einem bestimmten Zeitpunkt Ereignis heißt. Sind den diskreten Werten des Informationsparameters durch einen Code eindeutige Bedeutungen zugeordnet, spricht man von digitalen Signalen.

Rechenoperationen erfolgen auf Grund mathematischer Algorithmen in kombinatorischen und sequentiellen Schaltungen. Die Genauigkeit kann mit entsprechendem Aufwand beliebig gesteigert werden.

Analoge Signale sind stetig und können im Gegensatz zu den diskreten jeden beliebigen Wert zwischen zwei Grenzen annehmen. Sie sind ein proportionales Abbild einer anderen physikalischen Größe (z.B. Zeigerausschlag als Funktion der Spannung). Rechenoperationen lassen sich mit analogen Signalen auf der Grundlage physikalischer Gesetze durchführen, wobei Genauigkeiten von etwa 1 ‰ erreichbar sind. Aus analogen Signalen entstehen durch Quantisierung bzw. Codierung diskrete Signale.

2.2. Wirkprinzipien für NC

Numerische Steuerungen weisen keinen allgemeingültigen Informationsfluß auf, sondern sind sowohl als offene Steuerketten als auch mit Regelkreisen aufgebaut. In TGL 14591 wird unter Steuern ein solcher Vorgang verstanden, bei dem eine oder mehrere Größen als Eingangsgrößen andere Größen als Ausgangsgrößen auf Grund der dem abgegrenzten System eigenen Gesetzmäßigkeiten beeinflussen. Charakteristisch für das Steuern ist ein nicht fortlaufend geschlossener Wirkungsweg.

Vereinen Schrittmotoren Antrieb und Maßverkörperung in sich, liegt eine offene Ablaufsteuerung vor, bei der die gesteuerte Größe nur von den Zuständen (Abläufen) bestimmter Größen der Steuerung selbst und einem Programm abhängt (TGL 14591, Ausnahme Verweilzeit $\triangleq$ Zeitplansteuerung).

Regelung ist ein technischer Vorgang in einem abgegrenzten System, bei dem eine technische oder physikalische Größe (Regelgröße) fortlaufend erfaßt und durch Vergleich ihres Signals mit dem Signal einer anderen Größe (Führungsgröße) im Sinn einer Angleichung beeinflußt wird (TGL 14591). Der Wirkungsablauf ist in sich geschlossen, die geregelte Größe wirkt über den Vergleich im Sinn einer Gegenkopplung auf sich selbst zurück.

Bahnsteuerungen (und mit steigender Tendenz auch Punkt-Strecken-Steuerungen) sind mit Geschwindigkeits- und Lageregelkreisen ausgerüstet, wodurch die Achsen den im datenverarbeitenden Prozeß ermittelten Führungsgrößen möglichst exakt nachgeführt werden. Bei diesen arbeitet daher nur noch die Sollwertaufbereitung in offener Kette.

Steuerungen, bei denen die Geschwindigkeitsreduzierung (Vorabschaltung) beim Einfahren gestuft erfolgt und beim Erreichen der Position (Koinzidenz) abgeschaltet wird, arbeiten als Abschaltkreis. Der Istzustand wird zwar laufend in die NC zurückgeführt, weshalb Abschaltkreise zur Regelung zählen, wirkt aber nur an wenigen diskreten Punkten auf die Stellgröße ein, dazwischen werden die Istwerte nur rechentechnisch verarbeitet.

Alle genannten Steuerungsarten lassen sich zwei Gruppen bezüglich der geometrischen Daten zuordnen:

- Steuerungen mit absoluter Verarbeitung
- Steuerungen mit inkrementaler Verarbeitung.

Beim absoluten Verfahren werden alle Wegkoordinaten auf einen festen Nullpunkt bezogen (Lagemessung). Die entsprechende Vermaßungsart in den technischen Zeichnungen ist das Bezugsmaßsystem. Bei durchgängiger absoluter Arbeitsweise sind demnach Konstruktionszeichnung, Dateneingabe in die NC, innere Verarbeitung und Istwerterfassung absolut gestaltet. Hybride Techniken sind durch Wandlung (Umrechnung durch EDVA; Wandlung inkrementaler Daten durch Summation in absolute) möglich, erfordern aber zusätzlichen Aufwand.

Bei absoluter Arbeitsweise ist mindestens das Koordinatensystem des Werkstücks x_W, y_W durch Festwertverrechnung (x_F, y_F) in das feste Koordinatensystem der Maschine x_M, y_M zu transformieren (Bild 2.4).

Durch die eindeutige Abbildung des Weges auf eine Maßverkörperung (Maschinenkoordinaten) ist die Reproduzierbarkeit der Istposition unabhängig von der Vorgeschichte und vom Zeitpunkt der Messung (Weiterbearbeitung nach Abschaltung unkritisch, nur neue Sollwertvorgabe nötig). Eventuell falsche Zwi-

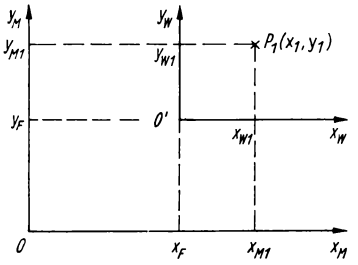


Bild 2.4. Festwerttransformation

schenergebnisse werden korrigiert. Das wird durch höheren Aufwand in der Meßtechnik gegenüber dem inkrementalen Verfahren erkauft.

Beim inkrementalen Verfahren werden alle Wegkoordinaten auf die vorherige Istposition bezogen (Wegmessung), was der Vermaßungsart Kettenmaßsystem entspricht. Vom Geber werden Weg-(Winkel-)inkremente Δs ($\Delta \alpha$), die seiner Auflösung entsprechen, angeboten und in der NC zählend verarbeitet. Dabei geht der Anfangspunkt des Bearbeitungszyklus verloren, und Referenzpunkte zur Reproduzierbarkeit sind künstlich zu schaffen (Nullpunktschalter, Nullimpuls). Bei fehlerfreier Arbeit ist $\Sigma x_i = 0$ und $\Sigma y_i = 0$ bei Rückkehr zum Ausgangspunkt.

Typisch für inkrementale Steuerungen ist der Zähler als zentrierendes Bauteil, wobei zur Korrektureinblendung auch gerechnet werden kann.

Nachteilig beim inkrementalen Verfahren ist bei eventuellen Fehlimpulsen das Verschleppen dieses Fehlers bis zur erneuten Nullung.

2.3. Steuerungsarten, Einteilungsmerkmale

Als gravierendes Kennzeichen einer NC dient die gegenseitige Abhängigkeit der Bewegungsvorgänge der Achsen. Dabei definieren wir die Achse als eine prinzipielle Richtung, in der eine Relativbewegung zwischen Werkstück und Werkzeug erfolgt (s. Abschn. 2.6.9.).

Positionsanzeigen

Unter Position verstehen wir den geometrischen Ort, den ein Werkzeug oder Werkstück einnimmt bzw. einnehmen soll, bezogen auf einen festen oder variablen Bezugspunkt.

Eine Positionsanzeige stellt die von einem Meßwertgeber gelieferte Information zur Geometrie einer Achse dekadisch bzw. sexagesimal (Altgrad) dar. Ihre Arbeitsweise ist meist inkremental. Die Zählung kann steigend sein bzw. nach Voreinstellung gegen Null gehen, bei letztgenannter Arbeitsweise können Vorabschalt- und Koinzidenzsignale ausgegeben werden. Damit wird die Positionsanzeige zu einem steuernden teilautomatisierten Gerät; zur Maßvorgabe und zum Start ist der Bedienende nötig.

Anwendung: Bohr- und Fräsmaschinen, Drehmaschinen,
Koordinatentische,
sonstige Mechanismen, bei denen physikalische Größen anzuzeigen sind, die sich als Weg oder Winkel darstellen und messen lassen (z.B. Massen, Mengen usw.).

Punktsteuerungen

Punktsteuerungen sind Automaten, die Bewegungsvorgänge mit dem Ziel des Erreichens einer vorgegebenen Position selbsttätig steuern. Ihr Merkmal ist, daß bis zum Erreichen der Sollposition kein Werkzeug im Eingriff ist und simultan verfahrene Achsen völlig unabhängig voneinander positioniert werden (Bild 2.5). Da der eingeschlagene Weg von P_n nach P_{n+1} nicht geführt wird, ist für genügend Spielraum des Werkzeugs gegen Kollision mit dem Werkstück zu sorgen. Die Verfahrgeschwindigkeit wird von der Steuerung selbst in Abhängigkeit vom Abstand zum Sollpunkt in fester Stufung ermittelt.

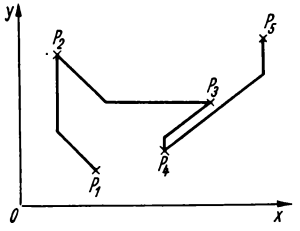


Bild 2.5. Positionieren, 2 Achsen simultan

Mit einfachen Punktsteuerungen lassen sich die Achsen nur nacheinander in achsparallelen bzw. drehenden Bewegungen steuern. Dieses serielle Verfahren ergibt die größte Positionierzeit.

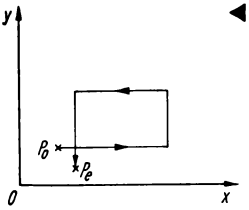
Nach dem Positioniervorgang erfolgt die Bearbeitung in einer weiteren Achse, die streckengesteuert ist (z.B. Bohren, Gewindeschneiden usw.). Die auszuführenden Operationen werden bezüglich Art, Folge, Dauer meist unter Einbeziehung einer Weg- bzw. Winkelmessung mit Koinzidenzabschaltung vom Programm satzweise vorgegeben.

Anwendung: Bohrwerke, Lehrenbohrwerke, Kreuzschiebetische u.ä.

Streckensteuerungen

Bei Streckensteuerungen erfolgt der Bewegungsablauf in Achsrichtung (Bild 2.6), wobei das Werkzeug im Eingriff sein kann. Die Geschwindigkeit dieses Bewegungsvorgangs ist daher im Gegensatz zur Punktsteuerung zu programmieren, die Vorschubreduzierung errechnet die Steuerung wieder selbst.

In Sonderfällen können auch bei Streckensteuerungen zwei Achsen gleichzeitig mit Werkzeugeingriff verfahren werden. Dazu wird eine Achse als Leitachse (im Bild 2.7 x-Achse) streckengesteuert, die zweite wird mitgeschleppt,



◀ *Bild 2.6*
Achsparallele Bewegung

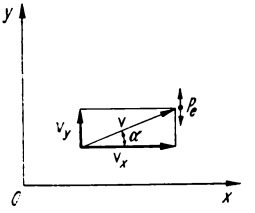


Bild 2.7
Mitschleppen einer Achse

ohne geführt und gemessen zu werden. Bei Erreichen des Koinzidenzwertes der Führungsachse werden beide Achsen abgeschaltet.

Die Schräge tan $\alpha = v_y/v_x$ ist von der Toleranz der Geschwindigkeiten abhängig, und nur der Vektor v_x wird genau ermittelt.

Die Streckensteuerung läßt sich weiter verfeinern, indem für Kegel und Schrägen digitale Teiler tan α = konstant als Sollwertgeber für die gekoppelten Achsen wirken. Dadurch dringt sie in das Anwendungsgebiet der Bahnsteuerung, insbesondere beim Drehen, ein.

Zwischen Punkt- und Streckensteuerung wird nur noch selten unterschieden.

Anwendung: Bohr- und Fräsmaschinen, Drehmaschinen, Schleifmaschinen, Bearbeitungszentren.

Bahnsteuerungen

Bei Bahnsteuerungen stehen mindestens zwei Achsbewegungen in einer festen Abhängigkeit zueinander (Bild 2.8). Mit Bahnsteuerungen können je nach technischer Konzeption beliebige ebene oder räumliche Kurven erzielt werden, wobei die Sollkurve (Sollfläche) durch Gerade, Kreis, Parabel oder Kurven höherer Ordnung (bzw. entsprechende Flächen) angenähert wird.

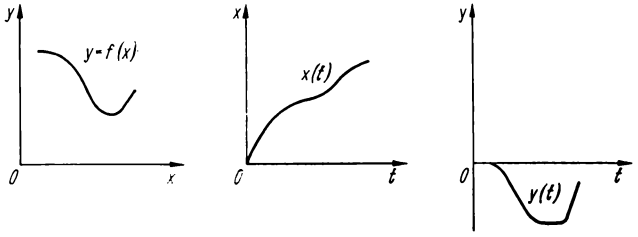


Bild 2.8. Funktioneller Zusammenhang bei Bahnsteuerungen

Bahnsteuerungen mit Inneninterpolator fügen zwischen Kurvenstützpunkte eine für die quasistetige Führung der Antriebe nötige Vielzahl von Sollwerten ein. Bei Steuerungen ohne Interpolator, bei denen die Punktfolge im Außeninterpolator erzeugt wird, ist die Informationsdichte im Eingangskanal so groß (bei v_t = 1,2 m/min und Auflösung von 10 µm z. B. 2000 Ortsinformationen/s und Achse), daß eine Eingabe über Magnetband erfolgen muß. Die Anfälligkeit des Datenträgers und die erschwerte Eingriffsmöglichkeit in das Programm verhinderten eine breite Einführung.

Bei Bahnsteuerungen spielt die Anzahl simultan zu verfahrender Achsen für den Aufwand eine so ausschlaggebende Rolle, daß man sie danach einteilt:

- 2achsige Bahnsteuerung, wenn zwei fest vorgegebene Achsen bahngesteuert werden (die Ebenen können umschaltbar sein)
- 2 1/2achsige Bahnsteuerung, wenn zwei Achsen aus einer beliebigen Ebene ausgewählt und bahngesteuert werden können, eine dritte gleichzeitig streckengesteuert ist
- n-achsige Bahnsteuerung, wenn n Achsen im funktionellen Zusammenhang stehen ($n \geqq 3$).

Mit steigender Anzahl simultan gesteuerter Achsen wird die Programmierung immer komplizierter und nur mit EDVA bei großer Speicherkapazität ausführbar. Die vierte und fünfte Achse dienen zum Einstellen der Schneidwerkzeuge so, daß immer mit hoher Zerspanleistung gearbeitet werden kann.

Anwendung: 2achsige Bahnsteuerung
Drehmaschinen, Brennschneidmaschinen, Zeichenmaschinen

2 1/2achsige Bahnsteuerung
Fräsmaschinen

3- und mehrachsige Bahnsteuerung
Fräsmaschinen für komplizierte räumliche Körper, (Modelle, Karosseriebau, Turbinenbau, Luft- und Raumfahrt) mit nicht abwickelbaren Oberflächen.

Nach der Art der Realisierung der Steueralgorithmen teilt man ein in
- NC mit festverdrahteter Informationsverarbeitung (verdrahtungsprogrammiert)
- NC mit in Halbleiterspeichern fest gespeichertem Programm
- CNC mit gespeicherter Logik und Rechnerkern (speicherprogrammiert).

An Entwicklungsgenerationen wurden durchlaufen
- erste Generation mit Relais bzw. Elektronenröhren
- zweite Generation mit diskreten Halbleiterbauelementen
- dritte Generation mit integrierten Halbleiterelementen.

2.4. Mathematische Grundlagen

2.4.1. Zahlendarstellung, Konvertierung

(Zur Vertiefung wird empfohlen *Rechenberg* [2.8], *Knüpfer* [2.9], *Götzke* [2.10], *Speiser* [2.12].)

Im täglichen Gebrauch haben sich stellenwertige Zahlensysteme durchgesetzt, da nur diese numerische Berechnung erlauben. Sie genügen der Formel

$$a = \sum_{i=-m}^{n} a_i B^i \tag{2.1}$$

$B \in N \setminus \{0, 1\}$ Basis

$i \in G$ Index

$a_i \in \{0, 1 \ldots, B-1\}$ Ziffer.

Ihre Schreibweise ist ohne Angabe der B^i und der Summenzeichen durch Aneinanderreihen der Ziffern a_i üblich, Stellenwertigkeit von rechts nach links steigend, gebrochener Teil durch Komma getrennt:

$$a = (a_n a_{n-1} \cdots a_1 a_0, a_{-1} \cdots)_B,$$

wobei die Angabe der Basis nur bei $B \neq 10$ nötig ist. Man vermeidet diese auch noch für $B = 2$, indem die Dualziffern 0 und 1 durch 0 und L ersetzt werden. Übliche Zahlensysteme sind

Dualsystem mit	$B = 2$
Oktalsystem mit	$B = 8$
Dezimalsystem mit	$B = 10$
Hexadezimalsystem mit	$B = 16$

Beispiel: Darstellung der Dezimalzahl 241

dual $1 \cdot 2^7 + 1 \cdot 2^6 + 1 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0$
$= \text{LLLL000L}$

oktal $3 \cdot 8^2 + 6 \cdot 8^1 + 1 \cdot 8^0 = (361)_8$

dezimal $2 \cdot 10^2 + 4 \cdot 10^1 + 1 \cdot 10^0 = 241$

hexadezimal $15 \cdot 16^1 + 1 \cdot 16^0 = (15\ 1)_{16}$

Arithmetische Berechnungen in elektronischen Datenverarbeitungsanlagen verlangen die Anpassung der Zahlendarstellung an die physikalischen Effekte der sie verarbeitenden (speichernden, transportierenden) Bauteile. Während mechanische Rechenwerke die 10 Ziffern des Dezimalsystems verarbeiten können, gestattet die Elektronik bei digitaler Arbeitsweise und vertretbarem Aufwand nur binäre Signale. Dieser Forderung werden das Dualsystem sowie das Oktal- und Hexadezimalsystem gerecht, wenn man bei letzteren jeweils eine Ziffer durch einen Block von $j = 3$ bzw. 4 Binärziffern $(b_{ij})_B$ darstellt.
Mit $B^i = (2^{\mathrm{ld}\,B})^i$ und $B^{i+1} = (2^{\mathrm{ld}\,B})^i \cdot 2^{\mathrm{ld}\,B}$ (Stellenwertigkeit) folgt die Eingliederung ins Dualsystem.
Beispiele: $\text{LLLL000L} \rightarrow (\text{0LL}\quad \text{LL0}\quad \text{00L})_8 = (361)_8$
$\rightarrow (\text{LLLL}\quad \text{000L})_{16} \quad = (15\ 1)_{16}$

Der Dualcode (Code s. Abschn. 2.6.) hat den Nachteil, daß sich beim Übergang zwischen zwei Zahlen mehrere Dualziffern gleichzeitig ändern können (z.B. $7 \rightarrow 8$, $\text{0LLL} \rightarrow \text{L000}$). Dadurch sind bei der Abtastung dualcodierter Maßverkörperungen Sondermaßnahmen nötig, um falsche Zwischenzustände auszuschalten (V-Abtastung); denn die praktische Ausführung läßt wegen Hysterese und Ansprechschwelle der Trigger kein synchrones Schalten erwarten.

Bei einschrittigen Codes (z.B. Graycode, reflektierter Binärcode) unterscheiden sich benachbarte Zahlen dagegen nur in einer Binärziffer, sie sind zum Rechnen jedoch ungeeignet.

Dualcode	Graycode
000	000
00L	00L
0L0	0LL
0LL	0L0
L00	LL0
L0L	LLL
LL0	L0L

usw.

Eine Decodierung in den Dualcode erfordert etwa den gleichen Aufwand wie die V-Abtastung.

Der historisch bedingte Gebrauch des Dezimalsystems fügt sich dagegen nicht redundanzfrei ein, da $2^4 > 10 > 2^3$ (s. S. 22). Seine Darstellung mit vier Binärziffern heißt binär codierte Dezimale (BCD), eine Vierergruppe Tetrade.

Den nachfolgenden drei Codierungen liegt die eindeutige Zuordnung der 10 Dezimalziffern $a_i \in \{0, 1, \ldots, 9\}$ zu den 15 Tetraden $t(a_i) \in \{0000, 000\text{L}, \ldots, \text{LLLL}\}$ zugrunde. Die sechs nicht benötigten Tetraden heißen „Pseudotetraden". Da die Lochstreifeninformationen direkt codiert sind, ist auch innerhalb der NC diese Codierung am weitesten verbreitet.

Tetrade	Code direkt	Aiken	Dreiexzeß
0000	0	0	Pseudo-tetraden
000L	1	1	
00L0	2	2	
00LL	3	3	0
0L00	4	4	1
0L0L	5	—	2
0LL0	6		3
0LLL	7	Pseudo-tetraden	4
L000	8		5
L00L	9		6
L0L0	—	—	7
L0LL	Pseudo-tetraden	5	8
LL00		6	9
LL0L		7	Pseudo-tetraden
LLL0		8	
LLLL		9	

Die direkte Codierung gehorcht der dualen Ziffernbewertung 8-4-2-1 in der Tetrade. Nachteilig ist die komplizierte Komplementierung und die relativ aufwendige Erfassung der $a_i \geqq 10$.

Beim Aikencode sind die Binärziffern mit 2-4-2-1 gewichtet. Sein Vorteil liegt in der einfachen Bildung des Neunerkomplements durch Negation jeder Binärziffer (z.B. $3 \triangleq 00LL \rightarrow NK\ 6 \triangleq LL00$; denn $3+6=9$; $00LL + LL00 = LLLL$).

Generell weisen diesen Vorteil alle Codierungen auf, die symmetrisch zur Mittellinie liegen. Die Dreiexzeßverschlüsselung läßt die leere Tetrade 0000 aus, wodurch Kontrollen bei der Verarbeitung erleichtert werden.

Codes mit zusätzlichen, leicht überprüfbaren Merkmalen heißen gesicherte Codes, z.B. der $\binom{5}{3}$-Code (sprich 3-aus-5-Code), bei dem jede Binärzahl genau 3mal L enthält. Wegen $2^5 = 32 \gg 10$ ist er sehr redundant.

Ausschlaggebend für die Codewahl sind

- Stellenzahl
- Konvertierbarkeit
- Komplementbildung
- Vermeidung des leeren bzw. L-Wortes
- Redundanz, Fehlererkennung
- Rechenbarkeit.

In der Praxis sind Umwandlungen vom Dezimal- in das Dualsystem (Konvertierung) und vom Dual- in das Dezimalsystem (Rückkonvertierung) mit Hilfe eines Code-Umsetzers (weiter DA-Umsetzer, Serienparallel-Umsetzer) nötig.

Zur manuellen Konvertierung stehen Tafeln und die Methode wiederholter Division durch 2 zur Verfügung, wobei die Reste der Einzeldivision die Dualziffern $a_0, a_1, \ldots, a_n$ ergeben.

Beispiel: $241:2 = 120$ Rest $1 \triangleq a_0$
$120:2 = 60$ Rest 0
$60:2 = 30$ Rest 0
$30:2 = 15$ Rest 0
$15:2 = 7$ Rest 1 ↑
$7:2 = 3$ Rest 1 | Dualzahl
$3:2 = 1$ Rest 1
$1:2 = 0$ Rest $1 \triangleq a_n$

$241 =$ LLLL000L

Schneller konvertiert das Oktalsystem.

Beispiel: $241:8 = 30$ Rest 1

$30:8 = 3$ Rest 6 ↑

$3:8 = 0$ Rest $3 \rightarrow (361)_8 \rightarrow$ (0LL LL0 00L)$_8$
(wie oben)

Die manuelle Rückkonvertierung geschieht entweder mit Tafeln (Umrechnung der Potenzen von 2 in Dezimalzahlen oder $a_k \cdot 8^{\pm n}$ in Dezimalzahlen) bzw. durch wiederholte Multiplikation.

Beispiele: a) 0LL LL0 00L $\rightarrow (361)_8 = 192 + 48 + 1 = 241$

b) LLLL 000L

$0 \cdot 2 +$	1	$=$	1
$1 \cdot 2 +$	1	$=$	3
$3 \cdot 2 +$	1	$=$	7
$7 \cdot 2 +$	1	$=$	15
$15 \cdot 2 +$	0	$=$	30
$30 \cdot 2 +$	0	$=$	60
$60 \cdot 2 +$	0	$=$	120
$120 \cdot 2 +$	1	$=$	241

Die n-stellige Dezimalzahl $a_{\text{Dez}} = \sum_{i=0}^{n-1} a_i \, 10^i \; i \in N$ wird maschinell konvertiert [2.8] [2.9], indem die tetradisch vorliegenden Dezimalziffern mit ihren Zehnerpotenzen multipliziert werden:

$$a_{\text{Dez}} = a_{n-1} \cdot 10^{n-1} + a_{n-2} \cdot 10^{n-2} + \cdots + a_1 \cdot 10_1 + a_0$$

$$= \{[(a_{n-1} \cdot 10 + a_{n-2}) \cdot 10 + a_{n-2}] \cdot 10 + \cdots a_1\} 10 + a_0$$

Beispiel: $5417 =$ 0L0L 0L00 000L 0LLL

$$= 5 \cdot 10^3 + 4 \cdot 10^2 + 1 \cdot 10^1 + 7 \cdot 10^0$$

$$= [(5 \cdot 10 + 4) \cdot 10 + 1] \cdot 10 + 7$$

Unter Bildung von Teilsummen gemäß Multiplikationsregeln (s. Abschn. 2.4.4.3.):

```
      0L0L·L0L0                  ≙ (5·10)
      ---------
      0000
      ----
      0000
     0L0L
     ----
     0L0L0
    0000
    -----
    00L0L0
   0L0L
   -------
   0LL00L0                       ≙ (50)
```

Durch den konstanten Multiplikator 10 mit zwei Ziffern L wird diese Rechnung vereinfacht:

```
          0L0L·L0L0
          ---------
          0L0L0                 einfache  }
        0L0L                    dreifache } Verschiebung
        -------
        0LL00L0                 (50)
           0L00                 (+ 4)
        -------
        0LL0LL0                 (54)

         LL0LL0·L0L0            (54 · 10)
         -----------
        LL0LL00
      LL0LL0
      ---------
      L0000LLL00                (540)
            000L                (+ 1)
      L0000LLL0L                (541)

      L0000LLL0L·L0L0           (541 · 10)
      --------------
     L0000LLL0L0
   L0000LLL0L
   ----------------
   L0L0L00L000L0                (5410)
            0LLL                (+ 7)
   ----------------
   L0L0L00L0L00L                (5417)
```

Die maschinelle Rückkonvertierung einer Dualzahl in eine Dezimalzahl erfolgt nach Umwandlung der Zahl in eine solche kleiner als 10 durch Division mit Zehnerpotenzen (Beseitigung von Pseudotetraden). Nach Abtrennung der Zahl

vor dem Komma und anschließender Multiplikation mit 10 rückt die nächste Tetrade vor das Komma, wird abgeschnitten usw. [2.8] [2.9].

Beispiel: Konvertiere 0,LLL0 ($\triangleq$ 0,857)

```
      0] LLL 0·L0L0
      ---------------
      L  LL0 0
    LLL  0
  ---------------
  L000] LL0 0
        LL0 0·L0L0
        ---------------
      L  L00 0
    LL0  0
  ---------------
  0LLL] L00 0
        L00 0·L0L0
        ---------------
      L  000 0
        L00 00
      ---------------
      0  L0L] 0000
```

Ergebnis: 0,L000 0LLL 0L0L = 0,875

2.4.2. Arithmetische Grundoperationen an Binärziffern

(s. a. [1.9] [2.8] bis [2.13] u. v. a. m.)

Numerische Steuerungen kommen mit den vier Grundrechenarten, dem Potenzieren und dem Wurzelziehen aus, läßt man die komplizierten Algorithmen für die Prozeßoptimierung außer Betracht, die sowieso den Einsatz eines Digitalrechners erfordert.

2.4.2.1. *Addition von drei Binärziffern (Volladder)*

Bei der Volladdition sind drei Variable zu verknüpfen. Gemäß Tafel 2.1 ist [2.13] die Summe

$$s_n = \bar{a}\,\bar{b}\,c \vee \bar{a}\,b\,\bar{c} \vee a\,\bar{b}\,\bar{c} \vee a\,b\,c$$

$$= c\,(\bar{a}\,\bar{b} \vee a\,b) \vee \bar{c}\,(\bar{a}\,b \vee a\,\bar{b}) \tag{2.2}$$

und der abgehende Übertrag

$$\ddot{u}_n = \bar{a}\,b\,c \vee a\,\bar{b}\,c \vee a\,b\,\bar{c} \vee a\,b\,c$$

$$= c\,(\bar{a}\,b \vee a\,\bar{b}) \vee a\,b\,. \tag{2.3}$$

Diese Gleichungen sind zur technischen Realisierung weiter umzuformen, wobei es eine Vielzahl von Darstellungsformen gibt. Man achte stets darauf, nur wenige unterschiedliche (die Kompliziertheit ist oft zweitrangig) Ausdrücke zu erhalten.

Tafel 2.1. Wahrheitstabelle des Volladders und Subtraktors

	a	b	$c=\ddot{u}_{n-1}$ $c=m_{n-1}$	Summe $s_n =$ $a+b+\ddot{u}_{n-1}$	Übertrag $\ddot{u}_n$	Differenz $d_n =$ $a-b-m_{n-1}$	Mangelübertrag m_n
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	L	L	0	L	L
3	0	L	0	L	0	L	L
4	0	L	L	0	L	0	L
5	L	0	0	L	0	L	0
6	L	0	L	0	L	0	0
7	L	L	0	0	L	0	0
8	L	L	L	L	L	L	L

Einzelbetrachtung der Äquivalenz $\bar{a}\,\bar{b} \vee a\,b$ aus Gl. (2.2):

$$\begin{aligned}
\bar{a}\,\bar{b} \vee a\,b &= \bar{a}\,\bar{b} \vee b\bar{b} \vee a\,b \vee a\,\bar{a} && \text{(Erweiterung mit } x\,\bar{x} = 0) \\
&= \bar{b}\,(\bar{a} \vee b) \vee a\,(\bar{a} \vee b) \\
&= (\bar{a} \vee b) \cdot (a \vee \bar{b}) && \text{(distributives Gesetz)} \\
&= \overline{\overline{(\bar{a} \vee b)\ (a \vee \bar{b})}} && (\bar{\bar{x}} = x) \\
&= \overline{\overline{(\bar{a} \vee b)} \vee \overline{(a \vee \bar{b})}} && \text{(De Morgansche Regel)} \\
&= \overline{a\,\bar{b} \vee \bar{a}\,b} = \overline{a \neq b} && \text{(dgl.),} \qquad (2.4)
\end{aligned}$$

d.h. Äquivalenz = negierte Antivalenz.
Partialsumme des Halbadders aus Gl. (2.2)

$$s_p = a\,\bar{b} \vee \bar{a}\,b = \overline{\overline{a\,\bar{b}} \vee \overline{a\,b}} = (a \vee b)\,\overline{a\,b} = \overline{\overline{(a\,\bar{b})}\,\overline{(\bar{a}\,b)}}. \qquad (2.5)$$

Damit gehen Gl. (2.2) und (2.3) über in die Antivalenzform

$$s_n = c\,\overline{s_p} \vee \bar{c}\,s_p = (c \vee s_p)\,\overline{c\,s_p} = \overline{\overline{c\,\bar{s}_p} \vee \overline{\bar{c}\,s_p}} \qquad (2.6)$$

$$\ddot{u}_n = c\,s_p \vee a\,b = \overline{\overline{c\,s_p} \vee \overline{a\,b}}, \qquad (2.7)$$

Bild 2.9 zeigt diskrete, Bild 2.10 NAND-Ausführung.

Bei serieller Addition entnimmt man Tafel 2.1:

Der Übertragsspeicher wird gesetzt durch $\ddot{u}_n = c \vee a\,b$ und hält sich so lange, bis ihn $\bar{a}\,\bar{b} = \bar{\ddot{u}}_n$ dominierend löscht, da für Überträge stets $\binom{3}{3}$ oder $\binom{3}{2}$ gilt.

2.4.2.2. *Subtraktion von zwei Binärziffern von einer dritten (Subtraktor)*

Gemäß Tafel 2.1. gilt

$$d_n = s_n \text{ mit } \ddot{u}_n \to m_n \qquad (2.8)$$

$$\begin{aligned}
m_n &= \bar{a}\,\bar{b}\,c \vee \bar{a}\,b\,\bar{c} \vee \bar{a}\,b\,c \vee a\,b\,c \\
&= \bar{a}\,(\bar{b}\,c \vee b\,c) \vee \bar{a}\,(b\,\bar{c} \vee b\,c) \vee b\,c\,(a \vee \bar{a}) \\
&= \bar{a}\,c \vee \bar{a}\,b \vee b\,c. \qquad (2.9)
\end{aligned}$$

Merke: Mangelübertrag zeigt negatives Ergebnis an.

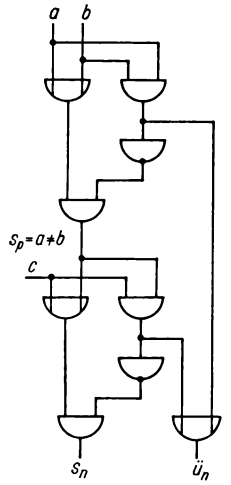


Bild 2.9. Volladder aus zwei Halbaddern (diskrete Schaltung)

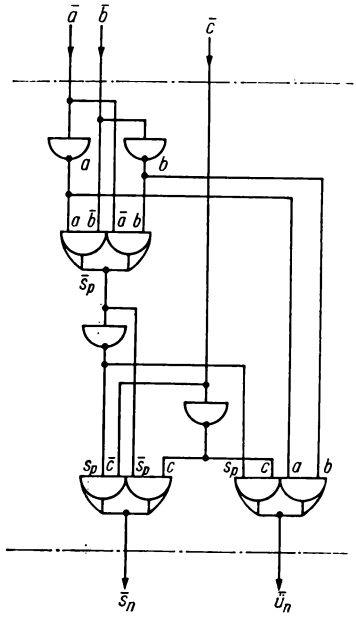


Bild 2.10. Volladder (NAND-Ausführung) ▶

2.4.3. Negative Zahlen

Durch die Darstellung relativer Zahlen wird die Subtraktion auf eine Addition zurückgeführt. Die negative Zahl kann ausgedrückt werden

- durch Vorzeichen und Betrag
- durch das B-Komplement (B Basis)
- durch das $(B - 1)$-Komplement.

Die inhomogene Angabe durch Vorzeichen und Betrag ist besonders für Multiplikation und Division geeignet. Beide Teile werden getrennt gespeichert und verarbeitet.

Zur Bestimmung des Subtrahenden wären die Absolutwerte der Zahlen zu vergleichen, weshalb die Komplementdarstellung vorgezogen wird.

Beispiel: $-13 \triangleq$ (L)LL0L $\quad +13 \triangleq$ (0)LL0L

Das B-Komplement (konegative Zahl) ergänzt die n-stellige Zahl $|-a_B|$ zur Zahl B^n und dient zur Darstellung der negativen Zahl $-a_B$.

$$\bar{a}_B = B^n - a_B \tag{2.10}$$

Beispiele: $a = 230, \bar{a}_{10} = 10^3 - 230 = 770$ (10-Komplement)

$$\underbrace{3 + 7 = B}$$

$a =$ L0L000, $\bar{a}_2 = 2^6 -$ L0L000 $=$ 0LL000 (2-Komplement)

$$\underbrace{\text{L} + \text{L} = \text{L0} = B}$$

Die Bildung des B-Komplements ist nicht für alle Ziffern einheitlich.

Regel: Die niedrigste von Null verschiedene Ziffer wird zu B ergänzt, die links von ihr stehenden zu $B-1$, rechts stehende Nullen bleiben.

Der positive Zahlenbereich $0\cdots(2^n-1)$ wird durch Zufügen der Vorzeichenstelle $(n+1)$, die homogen wie eine Ziffer behandelt wird, um den Bereich negativer Zahlen $2^n\cdots(2^{n+1}-1)$ erweitert.

Beispiel für 6stellige Dualzahlen:

$$+44 \triangleq 0.\text{L0LL00};\quad -44 \triangleq \text{L.0L0L00}$$

Das $(B-1)$-Komplement erfordert einheitlich die Ergänzung jeder Ziffer zu $B-1$:

$$\bar{a}_{(B-1)} = (B^n - 1) - a_B \tag{2.11}$$

$$\Rightarrow a_{10} + \bar{a}_9 = 999\ldots;\ a_2 + \bar{a}_1 = \text{LLL}\ldots \text{ mit je } n \text{ Ziffern.}$$

Merke: Aus dem $(B-1)$-Komplement erhält man das B-Komplement durch Addition von 1.

Beispiele: $a_{10} = 241$, $\bar{a}_9 = 999 - 241 = 758$ $(B-1)$-Komplement

$\bar{a}_{10} = 758 + 1 = 759$ B-Komplement

$a_2 = \text{L0LL0L0}$

$\bar{a}_1 = \text{0L00L0L}$ $(B-1)$-Komplement, Negation jeder Ziffer

$\bar{a}_2 = \text{0L00L0L} + \text{L} = \text{0L00LL0}$ B-Komplement

Bemerkung: Die Zahl Null kann gleichwertig positiv $0.000\cdots$ oder negativ $\text{L.LLL}\ldots$ dargestellt werden.

2.4.4. Grundrechenarten mit Dualzahlen

2.4.4.1. *Addition relativer Dualzahlen in Komplementdarstellung*

Grundgleichung:

$$\begin{aligned} a - b &= a + (2^n - b) - 2^n \\ &= a + \bar{b}_2 - 2^n \end{aligned} \tag{2.12}$$

Um Fehler bei Zahlenbereichsüberschreitung zu vermeiden – der entstehende Übertrag würde das Vorzeichenbit verfälschen –, wird eine Schutzstelle $(n+1)$ eingeführt und die Transformation modulo 2^{n+2} durchgeführt (Bild 2.11):

$$a - b = a + (2^{n+2} - b) - 2^{n+2} \tag{2.13}$$

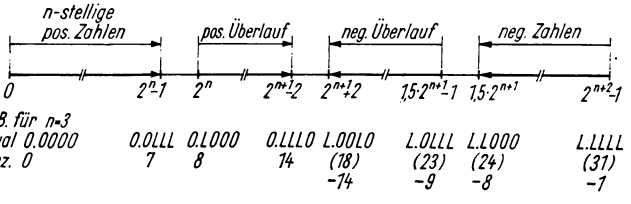


Bild 2.11. Zahlengerade

Regel: Bereichsüberschreitung ist eingetreten, wenn Vorzeichenstelle $\neq$ Schutzstelle.

Beispiele für 4stellige Dualzahlen mit Schutzstelle in B-Komplementdarstellung:

```
                Schutzstelle
                /
  9     0.0L00L
— 5     L.LL0L0 }
              L } B-Komplement
        LL  LL
+4 L) 0.00L00
  ↓
Abwurf 2^(n+2)
— 9     L.L0LL0          — 11          L.L0L00 } Wenn bei Ko-
              L                             L   } lonnenaddition
                                                 } nicht als Komplement
                                                 } vorhanden
+ 5     0.00L0L          — 9           L.L0LL0   → 4 Summanden!
                                              L
          LLL                            LLLL
— 4     0L.LLL00 ≙ d̄     — 20        L) L.0LL00
        ↑                              ↑↑
        kein Abwurf                    Bereichsüberschreitung
        000LL Rückkomplementierung     L00LL
            L                              L
          LL                             LL
|— 4|   00L00 Betrag der      |— 20|    L0L00
                negativen Zahl
```

Die Rückkomplementierung der konegativen Zahl $\bar{d} \to d$ hebt einen eventuell nicht erfolgten Abwurf -2^{n+2} wieder auf:

$$d = 2^{n+2} - \bar{d} = 2^{n+2} - [a + (2^{n+2} - b)] = b - a.$$

Bei der $(B - 1)$-Komplementierung modulo $2^{n+2} - 1$ ergibt das Abwerfen des Endübertrags (positives Ergebnis) vom Betrag 2^{n+2} einen Mangel von 1, der rückgängig zu machen ist. Man kann den Übertrag auf die niedrigste Ziffer zurückführen, wodurch alle Stellen gleichberechtigt sind.

Beispiele für 4stellige Dualzahlen mit Schutzstelle, $(B - 1)$-Komplementdarstellung

```
+ 9     0.0L00L        — 9   L.L0LL0
— 5     L.LL0L0        + 5   0.00L0L
        LLL                      L
        L 0.000LL        — 4 0 L.LL0LL  (B — 1)-Komplement
          ↳→L                  ↳→ 0
            LL
+ 4     0.00L00                L.LL0LL  (B — 1)-Komplement, konegative Zahl
                       |— 4|   00L00  Betrag der negativen Zahl
```

Ein Vergleich ergibt: Bei der Darstellung im B-Komplement kann die 1 am Übertragseingang der niedrigsten Stelle eingegeben werden, während der Endübertrag beim (B — 1)-Komplement einen vollen Rechenzyklus bedingt.

2.4.4.2. *Multiplikation von Dualzahlen* [1.9] [2.9] [2.12]

Die Multiplikation wird durch Addition von Teilprodukten und Verschiebungen der Dualzahlen im Register ausgeführt.

Das Vorzeichen des Produkts wird durch Überprüfung der Vorzeichen der Faktoren auf Gleichheit festgelegt.

Merke: Bei der Multiplikation eines n-stelligen Multiplikators mit einem m-stelligen Multiplikanden kann ein $(n + m)$-stelliges Produkt entstehen.

Ist die Registerkapazität nicht ausreichend, muß mindestens bei $m > n$ ein $(m + 1)$-Register gefordert werden, um wenigstens die Zahl m mit der höchsten Ziffer von n richtig multiplizieren zu können.

Durch geeignete Kombination des Akkumulators (wegen zeitweiligen Übertrags $n + 1$ Stellen) mit dem MR-Register (Bild 2.12) kann Registerkapazität eingespart werden, wodurch jedoch der Multiplikator verlorengeht.

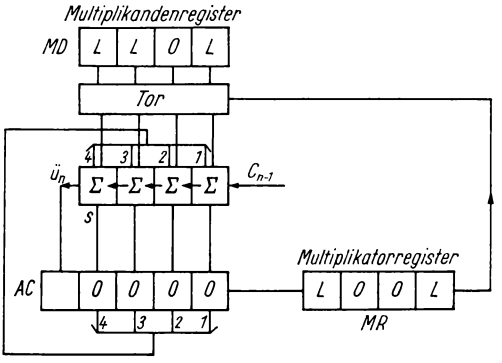


Bild 2.12. Multiplizierwerk

Beispiel: $13 \cdot 9 = 117$
MD (Multiplikand) AC (Produkt) MR (Multiplikator)

LL0L	00000	|L00L	Beginn
	0LL0L	|L00L	⟨MD⟩ + ⟨AC⟩ = ⟨AC⟩ wegen 2° vom MR ≙ L
	00LL0	L|L00	Verschiebung (Schieberegister!)
	00LL0	L|L00	0 + ⟨AC⟩ = ⟨AC⟩
	000LL	0L|L0	Verschiebung
	000LL	0L|L0	0 + ⟨AC⟩ = ⟨AC⟩
	0000L	L0L|L	Verschiebung
	0LLL0	L0L|L	⟨MD⟩ + ⟨AC⟩ = ⟨AC⟩
	00LLL	0L0 L|	Verschiebung ≙ Ergebnis

Die Rechenzeit beträgt bei paralleler Addition der Registerinhalte

$$t_{Pr} = n\,(t_A + t_V),\ t_A \text{ Additionszeit},\ t_V \text{ Verschiebezeit},$$

dagegen bei serieller Addition $t_{Pr}' = n^2 t_{GT}$. Serienmultiplikation s.u.a. [2.8] [2.9] [2.12].

2.4.4.3. *Division von Dualzahlen*

Die einfachste Division mit dem Divisor 2 bedarf nur der Rechtsverschiebung. Sonst wird der Divisor so oft vom Dividenden subtrahiert, solange das Ergebnis positiv bleibt; danach erfolgt eine Linksverschiebung in AC und MR/MQ.

Vor der Division müssen die Operanden normalisiert werden (höchste Stelle L), damit der Quotient < 2 wird, das am Schluß rückgängig zu machen ist. Somit wird mindestens nach der zweiten Subtraktion die Differenz unerlaubt:

(größter Dividend) — 2 (kleinster Divisor) < 0

$$(2^n - 1) - 2 \cdot 2^{n-1} = 2^n - 1 - 2^n = -1.$$

Verkürzter Algorithmus [1.9].

$D > 0$ ergibt Quotientenstelle $q_i = \mathrm{L} \Longrightarrow$ Linksverschiebung
$2\,D$ — Divisor = nächste Stelle

$D < 0$ ergibt Quotientenstelle $q_i = 0 \Longrightarrow$ Linksverschiebung
$[2\,(D$ — Divisor)] + Divisor $= 2\,D$ — Divisor = nächste Stelle wie oben.

Beispiel: 13:5 ≙ LL0L:0L0L normalisiert 13:10 ≙ LL0L:L0L0

	MD (Divisor)	AC (Dividend)		MQ (Quotient)	
Ausgang 10	0.L0L0	13	0.LL 0L	0 000	
— 10	L.0LL0	— 10	L. 0LL 0		
⟨AC⟩ — ⟨MD⟩ = D		+ 3	0. 0 0LL	0 00L	
Verschiebung		+ 6	0.0LL | 0	0 0L0	
⟨AC⟩ — ⟨MD⟩ = D		— 10	L.0LL | 0		
		— 4	L.LL0 | 0	0 0L0	
Verschiebung		— 8	L.L0 | 00	0 L00	
		+ 10	0.L0 | L0		
		+ 2	0.00 | L0	0 L0L	
Verschiebung		+ 4	0.0 | L00	L 0L0	Rest
⟨AC⟩ — ⟨MD⟩ = D		— 10	L.0 | LL0		
Ergebnis		— 6	L.L | 0L0	L, 0L0	

2.4.5. Grundrechenarten mit BCD-Zahlen

2.4.5.1. *6-Korrektur*

Beim Auftreten von Ergebnissen $\geqq 10$ in einer Tetrade ist wegen der unterschiedlichen Zykluslänge des dezimalen und hexadezimalen Systems die 6-Korrektur,

d.h. die Addition von 6, nötig, wodurch der Pseudotetradenbereich übersprungen und bei einem Übertrag ($\geqq 16$) das um 6 differierende Ergebnis berichtigt wird.

Aus dem Erkennen einer Pseudotetrade kann sofort ein Übertrag abgeleitet werden.

2.4.5.2. *Addition relativer BCD-Zahlen mittels 10-Komplements*

Bei der Darstellung im 10-Komplement erhalten wir prinzipiell die gleichen Verhältnisse wie bei Dualzahlen. Die aus den Pseudotetraden abgeleiteten partiellen Überträge (Pfeil) erübrigen eventuell einen zweiten Korrekturzyklus.

Beispiel: $-649 + 267 = -382$

9 3 5 0	L00	L.0 0LL 0L0L 0000	*B*-Komplement
1		L	
2 6 7		0.0 0L0 0LL0 0LLL	
1		LLL ← L LLL	Überträge
9 6 11 8	L00	L.0LL0 L0LL L000	
0 6 0	negative Zahl	0000 0LL0 0000	6-Korrektur
		LL	
16)			
9 6 +1 8		L.0LL0 L) 000L L000	konegative Zahl
3 8 1		00LL L000 000L	*B*-Komplement
1		L	
−3 8 2		L.00LL L000 00L0	

2.4.5.3. *Addition relativer BCD-Zahlen mittels 16-Komplements*

Da weder 9- noch 10-Komplement einfache Rechenregeln ergeben, ist es naheliegend, durch Negation das 15-Komplement und durch Addition von 1 das 16-Komplement zu bilden [1.9] [2.14] [2.15]. Das 16-Komplement gilt für die einzelne Dezimalenziffer einschließlich der Pseudodezimalen. Das Zahlensystem dagegen hat nur die Basis 10. Die Subtraktion je Tetrade hat damit folgende Gestalt

$$a - b = a + (16 - b) - 16 \tag{2.14}$$

$a \geqq b$: $a + (16 - b) \geqq 16$, es entsteht ein Übertrag, der die Addition von 1 in der Tetrade $i + 1$ zum Übergang vom 15- zum 16-Komplement auslöst und für die Tetrade i den Abwurf von -16 gemäß Gl. (2.14) bewirkt.

$a < b$: $a + (16 - b) < 16$, es entsteht kein Übertrag, wodurch von der Tetrade $(i + 1)$ die Zahl 1 ($\triangleq -16$ in Tetrade i) gemäß Gl. (2.10) subtrahiert wird.

Merke: Fehlender Übertrag bedeutet negative Differenz. Dabei tritt das Ergebnis konegativ auf. Um den Betrag zu erhalten, müßte das 10-Komplement gebildet werden, wodurch die Vorteile der Komplementierung modulo 16 wieder verlorengingen.

Man wertet daher vom ersten Rechenzyklus nur das Vorzeichen aus ($\ddot{u}_n = \mathrm{L} \rightarrow$ pos. Zahl; $\ddot{u}_n = 0 \rightarrow$ neg. Zahl) und läßt den zweiten Rechenzyklus modifiziert ablaufen (Beispiel b):

Wie im Dezimalen erscheint auch hier bei der 16-Komplementierung nur in der letzten Ziffer das B-Komplement, in allen anderen das $(B-1)$-Komplement (z.B. 724 → 276). Das erreicht man durch Sperren der + 1 in der niedrigsten Tetrade im 2. Rechenzyklus:
Tetrade 10^0: $a + (15 - b) - 16 = a - b - 1$ und durch 15-Komplementierung der konegativen Differenz
$15 - (a - b - 1) = 16 - (a - b)$ entsteht das 16-Komplement
$10^1 \cdots 10^n$: $15 - (a - b)$ ergibt das 15-Komplement.

Die Darstellung modulo 16 wird bei der Punkt-Strecken-Steuerung NC 470 verwendet.

Beispiele:

a) 543 − 237 = 306

5	4	3		0L0L	0L00	00LL	
13	12	8	K6	LL0L	LL00	L000	16-Komplement
1	0	1		L	Ł *m*[1])	L	Dezimalenübertrag
+ 19	16	12		L.00LL	L.0000 ↖	0.LL00	positive Differenz, unkorrigiert
			$\ddot{u}_n$ ↑				
3	0	12		00LL	0000	LL00	
15	15	9	K6	LLLL	LLLL	L00L	6-Korrektur
1	1	1		L	L	L	(— 6 ≙ L00L + L)
16+ 3	16+ 0	16+ 6		00LL	0000	0LL0	

b) 237 − 543 = − 306

			1. Rechenzyklus		
2	3	7	00L0	00LL	0LLL	
10	11	12	L0L0	L0LL	LL00	16-Komplement
	1	1	Ł *m*	L	L	
— 12	15	20	0.LL00 ↖	0.LLLL	L.0L00	konegative Differenz
12	15	4	LL00	LLLL	0L00	
9	9	15	L00L	L00L	LLLL	6-Korrektur
1	1	1	L	L	L	
22	25	20	L.0LL0	L.L00L	L.0L00	
(—) 6	9	4	0LL0	L00L	0L00	konegative Differenz
			2. Rechenzyklus		
2	3	7	00L0	00LL	0LLL	15-Komplement bei
10	11	12	L0L0	L0LL	LL00	1. Tetrade
	1	0	Ł *m*	L	0(!)	16-Komplemente bei
			↖			2. ... *n*. Tetrade
— 12	15	19	0.LL00	0.LLLL	L.00LL	konegative Differenz unkorrigiert
12	15	3	LL00	LLLL	00LL	
3	0	12	00LL	0000	LL00	15-Komplemente
15	15	9	LLLL	LLLL	L00L	6-Korrektur
1	1	1	L	L	L	
(−) 16+3	16+0	16+6	L. 00LL	L. 0000	L.0LL0	

[1]) *m* Mangel heißt $c_3 = 0$; (c_3 s. Abschn. 5.7.2.)

2.4.5.4. *Multiplikation von BCD-Zahlen*

Multiplikation im BCD kann schnell mit „Multiplikationstafeln", d.h. (9; 9)-Matrizen mit den Produkten im Schnittpunkt, erfolgen. Für NC ist die zeitaufwendige, aber einfachere Mehrfachaddition anwendbar. Nach Abarbeitung einer Stelle des Multiplikators erfolgt eine Verschiebung im AC und MR, wobei die Zahl der Additionen in einem mit der aktuellen Ziffer des Multiplikators voreingestellten und bei jeder Addition um — 1 zurückgezählten Zähler überwacht wird (im Mittel 4,5 Addition je Ziffer).

Beispiel: 738 · 402 = 296 676 (dargestellt an Dezimalziffern)

MD	AC	MR	
738	0000	402	Beginn
	0738	401	⟨MD⟩ + ⟨AC⟩ = ⟨AC⟩
	1476	400	dsgl.
	0147	640	Verschiebung
	0014	764	Verschiebung
	0752	763	⟨MD⟩ + ⟨AC⟩ = ⟨AC⟩
	1490	762	dsgl.
	2228	761	dsgl.
	2966	760	dsgl.
	0296	676	Verschiebung ≙ Endergebnis

2.5. Interpolationsverfahren

2.5.1. Allgemeines

Ermittelt man nach einem mathematischen Gesetz zwischen grobschrittigen programmierten Kurvenstützpunkten Zwischenwerte als Führungsgrößen zum Erhalt der erforderlichen Genauigkeit, spricht man von Interpolation. Inneninterpolatoren für drei Achsen arbeiten überwiegend, solche für mehr als drei Achsen ausschließlich linear, da sich zusätzliche Drehbewegungen in keinem Inneninterpolator anders verarbeiten lassen.

Die folgenden Darstellungen zur linearen Interpolation sind auf dreidimensionale Probleme übertragbar, die Kreisinterpolation beschränkt sich meist auf eine Ebene. (Eine dreidimensionale Lösung erläutert *Fischer* [2.16].) Oft ist der Vollkreis als Programmsatz ausgeschlossen.

Der geometrische Verlauf einer zweidimensionalen Bahn läßt sich mathematisch in drei Formen beschreiben,

- explizit: $y = f(x)$, bei der einer Achse der Vorrang gegeben wird (unabhängige Variable). Diese Form ist für achsparallele Bewegungen und damit generell ungeeignet.
- implizit: $f(x, y) = 0$. Diese Form bildet die Grundlage zur direkten Funktionsberechnung (Such-Schrittverfahren).
- durch Parameter: $x = x(\tau)$; $y = y(\tau)$.

  Diese Form ist die Grundlage für die Digitale-Differenzen-Summation (DDS), auch DDA (englisch digital differential analyzer)-Verfahren [s. Gl. (2.19)] genannt, sowie für analog arbeitende Methoden.

Die Parameterdarstellung kommt dem Einzelantrieb der Achsen und deren Verknüpfung über die Zeit ($\tau \sim t$) sehr entgegen. Rechnerintegrierte Steuerungen (CNC) gestatten, direkte Funktionsberechnung aus der Parameterdarstellung bzw. aus Polynomentwicklungen durch Näherungsverfahren durchzuführen (s. a. Abschn. 6.2.4.2.). Wegen ihrer Langzeitkonstanz, leichten Speicherbarkeit und der beliebig genauen Auflösung werden fast ausschließlich digitale Interpolationsverfahren angesetzt.

2.5.2. DDA-Verfahren [1.1] [2.16] bis [2.19]

Ausgang ist die Kurvengleichung in Parameterform

$$x = x(\tau);\ y = y(\tau).$$

Durch Differentiation erhält man die Dgl.

$$\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}\tau} = \dot{x}(\tau);\quad \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}\tau} = \dot{y}(\tau),$$

deren Lösung mit den Anfangsbedingungen x_0, y_0 die Integralgleichungen (Grundgleichungen eines Integrators, Bild 2.13) ergibt:

$$x = x_0 + \int_{\tau=t_0}^{t_n} \dot{x}(\tau)\,\mathrm{d}\tau;\ y = y_0 + \int_{\tau=t_0}^{t_n} \dot{y}(\tau)\,\mathrm{d}\tau. \tag{2.15}$$

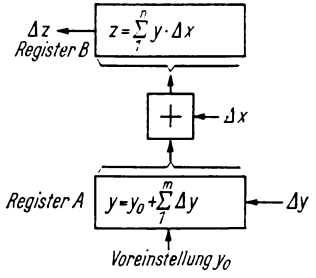


Bild 2.13. Integrator [2.16] [2.20]

Das Integral der Form $z = \int_{x_0}^{x_n} y\,\mathrm{d}x \approx \sum_{i=0}^{n} y_i \Delta x$ kann durch die Rechteckformel (Differenzsummen)

$$\begin{aligned} z &= \Delta x\,(y_0 + y_1 + \cdots + y_{n-1}) \\ &= \Delta x\,\{y_0 + (y_0 + \Delta y_1) + [(y_0 + \Delta y_1) + \Delta y_2] + \cdots\} \\ &= \Delta x\left(y_0 + \sum_{1}^{n} \Delta y\right) \end{aligned}$$

angenähert werden, dessen Realisierung nach Bild 2.13 [2.16] [2.20] erfolgt.

Die Multiplikation $\Delta x \cdot y$ geschieht bei jedem Δx durch Addition des Registers A zu Register B (parallel oder seriell), womit in Register B das Integral

$z = \int_{x_0}^{x_n} y \, dx$ steht. Ein Impuls Δz entsteht, wenn die Kapazität von Register B überschritten wird.

Aus Gl. (2.15) wird

$$x = x_0 + \sum_{i=1}^{n} \dot{x}(t_i)\,\Delta t \qquad T = t_n - t_0 \text{ Interpolationszeit}$$

$$= x_0 + \sum_{i=1}^{n} \dot{x}(t_i)\frac{T}{n} \qquad n = \frac{T}{\Delta t} \text{ Schrittzahl}$$

$$y = y_0 + \sum_{i=1}^{n} \dot{y}(t_i)\frac{T}{n} \qquad t = i\,\Delta t + t_0$$

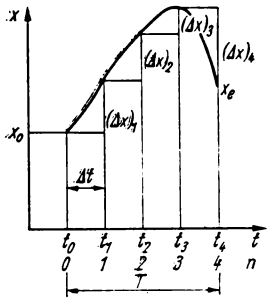
$$i \in [1; n] \qquad i \in N.$$

Unter dem Summenzeichen steht der Zuwachs je Schritt

$$\dot{x}(t_i)\,\Delta t = (\Delta x)_i,$$

mit dem die Treppenkurven $x(t)$, $y(t)$ sichtbar sind (Bild 2.14):

$$x = x_0 + \sum_{i=1}^{n} (\Delta x)_i; \quad y = y_0 + \sum_{i=1}^{n} (\Delta y)_i. \tag{2.16}$$



◀ *Bild 2.14. Treppenkurve DDA-Verfahren*

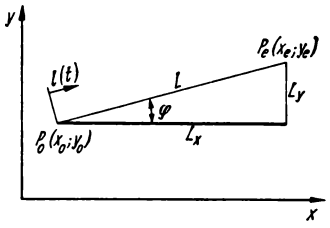


Bild 2.15. Linearinterpolation, DDA-Verfahren

2.5.2.1. *Geradeninterpolation DDA*

Die Strecke $L = P_0 P_e$ ($\triangleq$ Stützpunktabstand) nach Bild 2.15 soll in der Zeit T gleichmäßig durchlaufen werden:

$$l(t) = L\frac{t}{T};$$

$$l_x = L\frac{t}{T}\cos\varphi; \qquad l_y = L\frac{t}{T}\sin\varphi.$$

Daraus die Geradengleichung in Parameterform:

$$\left.\begin{aligned} x(t) &= x_0 + L\,\frac{t}{T}\cos\varphi \\ y(t) &= y_0 + L\,\frac{t}{T}\sin\varphi \end{aligned}\right\} \quad \begin{aligned} &t \text{ Parameter Zeit} \\ &0 \leqq t \leqq T \end{aligned}$$

$$\dot{x} = \frac{L}{T}\cos\varphi = \frac{L_x}{T}\,; \qquad \dot{y} = \frac{L}{T}\sin\varphi = \frac{L_y}{T}\,, \tag{2.17}$$

Integralgleichungen gemäß Gl. (2.15):

$$x = x_0 + \int_{t=0}^{T} \frac{L_x}{T}\,\mathrm{d}t;\; y = y_0 + \int_{t=0}^{T} \frac{L_y}{T}\,\mathrm{d}t, \tag{2.18}$$

Näherungsformeln mit $\mathrm{d}t \approx \Delta t$

$$x \approx x_0 + \sum_{i=1}^{k}\left[\frac{L_x}{T}\,\Delta t\right]_i;\; y \approx y_0 + \sum_{i=1}^{k}\left[\frac{L_y}{T}\,\Delta t\right]_i$$

Führt man die Schrittzahl $n = \dfrac{T}{\Delta t}$, $L_x = x_e - x_0$; $L_y = y_e - y_0$ und $\Delta x = \dfrac{x_e - x_0}{n}$ ein, folgt die Interpolationsformel aus Gl. (2.16):

$$\begin{aligned} x_i &= x_0 + \sum_{i=1}^{n}\left[\frac{x_e - x_0}{n}\right]_i = x_0 + \sum_{i=1}^{n}[\Delta x]_i \\ y_i &= y_0 + \sum_{i=1}^{n}\left[\frac{y_e - y_0}{n}\right]_i = y_0 + \sum_{i=1}^{n}[\Delta y]_i\,. \end{aligned} \tag{2.19}$$

Mit Gl. (2.19) werden $n - 1$ Zwischenpunkte ermittelt ($\Sigma\,\Delta x$, $\Sigma\,\Delta y$). Die Führungsgröße für den Antrieb wird nur dann um $\pm$ 1 Inkrement i verändert, wenn bei der Summierung der Rechenschritte (1 Rechenschritt $\leqq$ 1 Inkrement) der Wert eines Inkrements erreicht bzw. überschritten wurde $\Sigma\,\Delta x - \Sigma i_x \geqq i_x$, der Rest ist zu speichern.

Beispiel (Bild 2.16):

Gerade $P_0\,(0;0)$; $P_e\,(5;3)$; Schrittzahl $n = 10$.

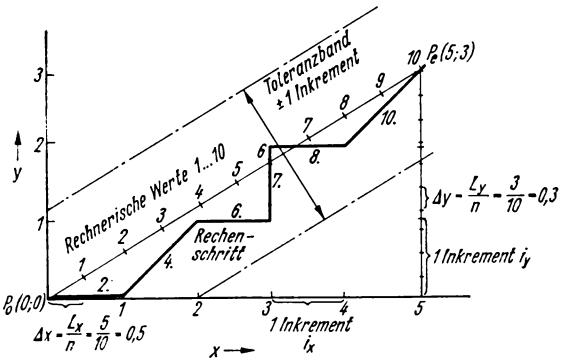


Bild 2.16. Beispiel

Weginkremente $i_x = i_y = 1$ (keine allgemeine Bedingung!)

Rechenschritt	$\Sigma \Delta x - \Sigma i_x$		$\Sigma \Delta y - \Sigma i_y$	
1	$0{,}5 - 0 = 0{,}5$		$0{,}3 - 0 = 0{,}3$	
2	$1{,}0 - 0 = 1$	$\Rightarrow i_x$	$0{,}6 - 0 = 0{,}6$	
3	$1{,}5 - 1 = 0{,}5$		$0{,}9 - 0 = 0{,}9$	
4	$2{,}0 - 1 = 1$	$\Rightarrow i_x$	$1{,}2 - 0 = 1{,}2$	$\Rightarrow i_y$
5	$2{,}5 - 2 = 0{,}5$		$1{,}5 - 1 = 0{,}5$	
6	$3{,}0 - 2 = 1$	$\Rightarrow i_x$	$1{,}8 - 1 = 0{,}8$	
7	$3{,}5 - 3 = 0{,}5$		$2{,}1 - 1 = 1{,}1$	$\Rightarrow i_y$
8	$4{,}0 - 3 = 1$	$\Rightarrow i_x$	$2{,}4 - 2 = 0{,}4$	
9	$4{,}5 - 4 = 0{,}5$		$2{,}7 - 2 = 0{,}7$	
10	$5{,}0 - 4 = 1$	$\Rightarrow i_x$	$3{,}0 - 2 = 1$	$\Rightarrow i_y$

Die Vorschubgeschwindigkeit in Bahnrichtung $v_T = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}$ wird durch die Rechenfrequenz variiert. Da je Rechentakt in jeder Achse ein Recheninkrement Δx, Δy addiert wird, folgt

$$\left.\begin{aligned} f_T = \frac{n}{T}\,;\ \dot{x} &= \frac{L_x}{n} f_T \\ \dot{y} &= \frac{L_x}{n} f_T \end{aligned}\right\} \rightarrow v_T = \frac{L}{n} f_T . \tag{2.20}$$

Mit der Vorschubzahl $\frac{v_T}{L} = \frac{f_T}{n}$ (2.21)

wird $\dot{x} = \frac{v_T}{L} L_x \approx \frac{\Delta x}{\Delta t}\,;\ \dot{y} = \frac{v_T}{L} L_y \approx \frac{\Delta y}{\Delta t}$.

Die Vorschubzahl dient zur vereinfachten Vorschubprogrammierung, indem bei konstanter Zeitdifferenz Δt bzw. Taktfrequenz die Schrittweiten Δx, Δy variiert werden:

$$\Delta x \approx \frac{v_T}{L} L_x \Delta t;\ \Delta y \approx \frac{v_T}{L} L_y \Delta t . \tag{2.22}$$

Gln. (2.22) werden in der Praxis zur Bestimmung der Δx bzw. Δy in Gl. (2.19) verwendet.

Mit Hilfe der Vorschubzahl $\frac{v_T}{L}$, die eingegeben wird, ist der Zeitbezug hergestellt und v_T = konstant erreichbar, ohne konstanten Stützpunktabstand L fordern zu müssen.

Merke: Das DDA-Verfahren hält die Bahngeschwindigkeit unabhängig von der Bewegungsrichtung konstant.

2.5.2.2. *Kreisinterpolation DDA*

Kreisgleichung (Bild 2.17):

$$x = x_m + R\cos\varphi;\ \ y = y_m + R\sin\varphi . \tag{2.23}$$

Mit dem Parameter $\frac{t}{T} = \varphi$ (T = Zeit für den Durchlauf von 1 rad) erhält man die Parameterform der Kreisgleichung in beliebiger Lage:

$$x = x_m + R \cos \frac{t}{T}\,; \quad y = y_m + R \sin \frac{t}{T}\,.$$

Differenziert

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -\frac{R}{T} \sin \frac{t}{T} = -\frac{y - y_m}{T} = -\frac{R_y}{T} \\ \dot{y} &= \frac{R}{T} \cos \frac{t}{T} = \frac{x - x_m}{T} = \frac{R_x}{T}\,. \end{aligned} \tag{2.24}$$

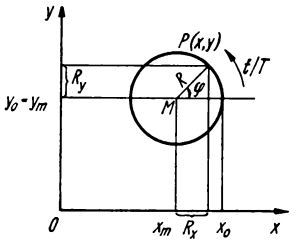


Bild 2.17. Zirkularinterpolation, DDA-Verfahren

Integralgleichung durch Lösung der Differentialgleichung, Anfangsbedingungen x_0, y_0

$$x = x_0 - \int_{t=0}^{t} \frac{y - y_m}{T}\,\mathrm{d}t\,; \quad y = y_0 + \int_{t=0}^{t} \frac{x - x_m}{T}\,\mathrm{d}t\,.$$

Mit der Schrittzahl für 1 rad $n = \frac{T}{t}$; $\Delta\varphi = \frac{1}{n}$ (Schrittwinkel) und $\mathrm{d}t \approx \Delta t$ folgt die Interpolationsformel:

$$\begin{aligned} x_i &\approx x_0 - \sum_{i=1}^{i_e} \frac{y_{i-1} - y_m}{n} = x_0 - \sum_{i=1}^{i_e} [\Delta y]_i \\ y_i &\approx y_0 + \sum_{i=1}^{i_e} \frac{x_{i-1} - x_m}{n} = y_0 + \sum_{i=1}^{i_e} [\Delta x]_i\,; \end{aligned} \tag{2.25}$$

i_e Ordnungszahl für letzten Zeitschritt.

Beachte: $i_e \neq n$; $i_e = n$ nur für $\frac{t}{T} = 1$!

Für die Tangentialgeschwindigkeit gilt (Bild 2.18)

$$v_T = \omega \cdot R\,.$$

Aus $\triangle MAP_i \sim \triangle P_i BP_{i+1}$

$$v_T : R = v_x : (y_i - y_m)$$

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} \approx \dot{x} = -\frac{v_T}{R}(y_i - y_m) = -\omega (y_i - y_m) \tag{2.26}$$

$$\frac{\Delta y}{\Delta t} \approx \dot{y} = \frac{v_T}{R}(x_i - x_m) = \omega (x_i - x_m).$$

Jetzt ist $\frac{v_T}{R}$ die Vorschubzahl ($\triangleq \omega$).

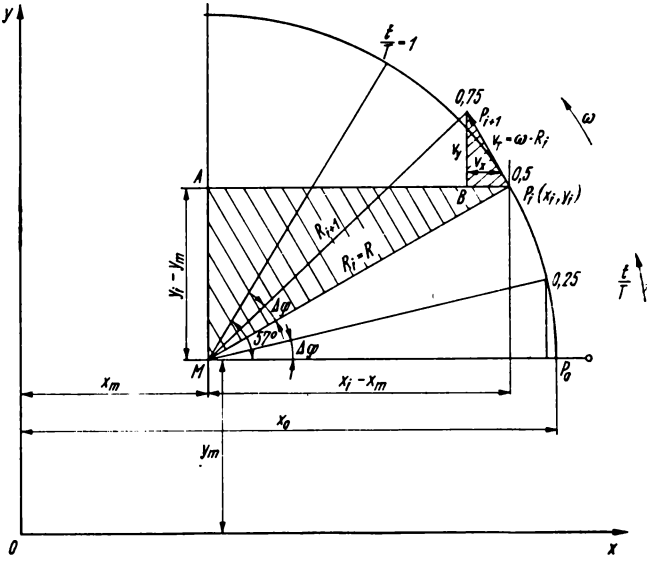


Bild 2.18. Tangentialgeschwindigkeit

Die Verbindung zur Taktfrequenz ist nach Gl. (2.24) gegeben mit

$$f_T = \frac{n}{T} \quad \text{und} \quad v_T = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} = \frac{R}{T} \rightarrow \text{konst.} \tag{2.27}$$

durch $\frac{v_T}{R} = \frac{f_T}{n} = \omega$. (2.28)

Wie oben lassen sich aus Gl. (2.26) Δx und Δy errechnen und in Gl. (2.25) verwenden.

Die Ähnlichkeit der Gln. (2.19) und (2.25) gestattet gleichen gerätetechnischen Aufbau beider Interpolationsarten (s. Bilder 5.69 und 5.70).

Die Genauigkeit der DDA-Interpolation wird mit dem Aufbiegen des Kreises durch Bewegung in Tangentenrichtung festgelegt (Bild 2.18). Da nach Gl. (2.25)

jeder neue Punkt von den Koordinaten des vorherigen abhängt, tritt ein sich summierender Fehler ein.

Aus Gl. (2.24) errechnet sich mit $\frac{t}{T} = \varphi$

$$\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} = (x - x_m)\frac{\varphi}{t} \Rightarrow \Delta y = (x - x_m)\,\Delta\varphi \tag{2.29}$$

$$\Delta x = -(y - y_m)\,\Delta\varphi\,.$$

Die exakte Kreisgleichung

$$(x_i - x_m)^2 + (y_i - y_m)^2 = R^2 \tag{2.30}$$

wird beim Übergang vom Schritt i nach $i + 1$

$$[(x_i + \Delta x) - x_m]^2 + [(y_i + \Delta y) - y_m]^2 = R_{i+1}^2\,. \tag{2.31}$$

Gl. (2.29) in Gl. (2.31) eingesetzt ergibt nach i Schritten

$$R^2[1 + (\Delta\varphi)^2]^i = R_i^2\,. \tag{2.32}$$

Mit $\Delta\varphi \ll 1$ läßt sich Gl. (2.32) in die binomische Reihe entwickeln:

$$R_i = R[1 + (\Delta\varphi)^2]^{i/2} \approx R\left[1 + \frac{i}{2}(\Delta\varphi)^2 + \cdots\right].$$

Mit $\Delta\varphi = \frac{1}{n}$ wird $R_i/R \approx 1 + \frac{i}{2}\left(\frac{1}{n}\right)^2$.

Für das Interpolationsende gilt $i = i_e$ und $n{:}1 = i_e{:}\,\varphi_e$,

$$\frac{R_{ie}}{R} \approx 1 + \frac{i_e}{n}\left(\frac{1}{n}\right)^2 = 1 + \frac{\varphi_e}{2n}\,. \tag{2.33}$$

Für den Viertelkreis mit $\varphi_e = \frac{\pi}{2}$ und $\Delta\varphi = \frac{b}{R} = \frac{1}{n}$

wird bei $b = 1$ Weginkrement

$$\frac{R_{ie}}{R} = 1 + \frac{\frac{\pi}{2}b}{2R}\,;\quad R_{ie} - R = \Delta R \approx \frac{\pi}{4}b = 0{,}79 \text{ Weginkremente.}$$

Götz [2.18] gibt eine genauere, aber aufwendigere Interpolationsformel an.

2.5.3. Verfahren direkter Funktionsberechnung (Such-Schritt-Verfahren) [1.1] [2.16] bis [2.19]

Bei diesem Iterationsverfahren wird in jedem Rechenschritt der Funktionswert $f(x, y)$ bestimmt und aus dessen Vorzeichen der nächste Vorschubimpuls i in der Koordinate ausgelöst, mit dem der Funktionswert gegen Null geführt wird (Bild 2.19). Im Unterschied zum DDA-Verfahren geschieht das jeweils in nur einer Achse.

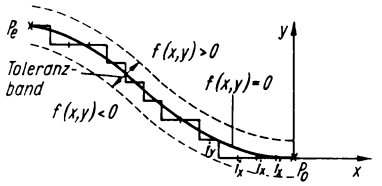


Bild 2.19. Verfahren direkter Funktionsberechnung

2.5.3.1. *Geradeninterpolation, direkte Funktionsberechnung*

$$f(x, y) \equiv y\, x_e - x y_e = 0 \text{ (Gerade ab Ursprung)} \tag{2.34}$$

$$\frac{\mathrm{d}\, y}{\mathrm{d}\, x} = m = \frac{y_e}{x_e}$$

Integralgleichung

$$\int_{y_0}^{y} x_e \,\mathrm{d}\, y - \int_{x_0}^{x} y_e \,\mathrm{d}\, x = 0\,. \tag{2.35}$$

Mit $\mathrm{d}y \approx \Delta\, y$, $\mathrm{d}x \approx \Delta\, x$ entsteht die Interpolationsformel

$$\begin{aligned} f(x, y) \approx f(x_k, y_l) &= \sum_{i=1}^{k} y_e\, \Delta\, x + \sum_{j=1}^{l} x_e\, \Delta\, y \\ &= D_{k+l} \to 0 \\ &= \sum_{i=1}^{k} \Delta\, D_{xi} + \sum_{j=1}^{l} \Delta\, D_{yj} \end{aligned} \tag{2.36}$$

$k, l \in N$; $n = k + l$ Schrittzahl

$E = |\Delta\, x| = |\Delta\, y| = 1$; D_{k+l} Entscheidungsoperator.

Die Veränderung des Entscheidungsoperators ist exakt, da

$$\begin{aligned} (\Delta f)_x \equiv \Delta\, D_{xk} &= f(x_i \pm 1, y_j) - f(x_i, y_j) \\ &= [y\, x_e - (x+1)\, y_e] - [y x_e - x y_e] = \mp\, y_e \\ (\Delta f)_y \equiv \Delta\, D_{yl} &= \pm\, x_e\,. \end{aligned} \tag{2.37}$$

Das doppelte Vorzeichen berücksichtigt den Durchlaufsinn. Der erste Schritt ist wegen $f(0; 0) = 0$ beliebig.

Aus Bild 2.20 folgen die Vorzeichen für die Schrittrichtung

$$\left.\begin{array}{l} +\,\Delta\, x \text{ bei } x_e > 0;\ +\,\Delta\, y \text{ bei } y_e > 0 \\ -\,\Delta\, x \text{ bei } x_e < 0;\ -\,\Delta\, y \text{ bei } y_e < 0 \end{array}\right\} \tag{2.38}$$

Beispiel (Bild 2.21):

Lineare Interpolation von P_0 (0; 0) bis P_e (8; 5), Rechenschritt 10 µm = 1 Einheit.

$$f(x, y) \equiv 8\, y - 5\, x = 0\,.$$

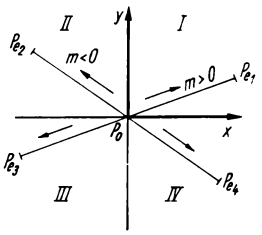


Bild 2.20. Linearinterpolation

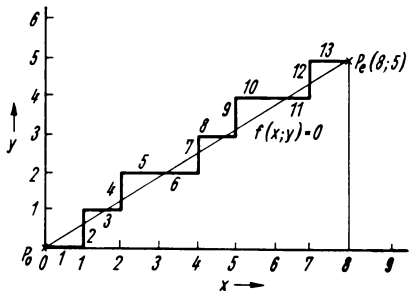


Bild 2.21. Beispiel

Tafel 2.2. Vorzeichen bei Linearinterpolation

		Quadrant I	II	III	IV
Vorzeichen	Δx	+	−	−	+
	Δy	+	+	−	−
	ΔD_{xk}	<0	<0	>0	>0
	ΔD_{yl}	>0	>0	<0	<0

Im I. Quadranten ist nach Tafel 2.2

$$\Delta D_{xk} = -y_e = -5;\ \Delta D_{yl} = +x_e = 8\,.$$

Bei veränderter Durchlaufrichtung (III. Quadrant) ist dagegen

$$P_0(0;0);\ P_e(-8;\ -5);\ \Delta D_{xk} = -y_e = 5;\ \Delta D_{yl} = x_e = -8\,.$$

I. Quadrant			III. Quadrant	
Schritt	Schritt-richtung	$D_{k+l} + \Delta D$	Schritt-richtung	$D_{k+l} + \Delta D$
1	$+\Delta x$	$0-5=-5$	$-\Delta x$	$0+5=+5$
2	$+\Delta y$	$-5+8=+3$	$-\Delta y$	$+5-8=-3$
3	$+\Delta x$	$+3-5=-2$	$-\Delta x$	$-3+5=+2$
4	$+\Delta y$	$-2+8=+6$	$-\Delta y$	$+2-8=-6$
5	$+\Delta x$	$+6-5=+1$	$-\Delta x$	$-6+5=-1$
6	$+\Delta x$	$+1-5=-4$	$-\Delta x$	$-1+5=+4$
7	$+\Delta y$	$-4+8=+4$	$-\Delta y$	$+4-8=-4$
8	$+\Delta x$	$+4-5=-1$	$-\Delta x$	$-4+5=+1$
9	$+\Delta y$	$-1+8=+7$	$-\Delta y$	$+1-8=-7$
10	$+\Delta x$	$+7-5=+2$	$-\Delta x$	$-7+5=-2$
11	$+\Delta x$	$+2-5=-3$	$-\Delta x$	$-2+5=+3$
12	$+\Delta y$	$-3+8=+5$	$-\Delta y$	$+3-8=-5$
13	$+\Delta x$	$+5-5=0$	$-\Delta x$	$-5+5=0$

2.5.3.2. *Kreisinterpolation, direkte Funktionsberechnung*

$$f(x, y) \equiv (x - x_m)^2 + (y - y_m)^2 - R^2 = 0. \tag{2.39}$$

$$\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x} = \frac{-f_x}{f_y} = -\frac{x - x_m}{y - y_m}.$$

Integralgleichung

$$\int_{y_0}^{y} (y - y_m)\,\mathrm{d}y + \int_{x_0}^{x} (x - x_m)\,\mathrm{d}x = 0. \tag{2.40}$$

Die Annäherung der Integrale ist durch die Rechteckformel, die Trapez-, Tangenten-Näherung, die Simpsonsche Regel u. a. möglich [2.13].

Die Rechteckformel[1]) liefert mit $\mathrm{d}x \approx \Delta x$ und $\mathrm{d}y \approx \Delta y$ die Interpolationsformel

$$f(x, y) \approx \sum_{i=0}^{k-1} (x_i - x_m)\,\Delta x + \sum_{j=0}^{l-1} (y_j - y_m)\,\Delta y = D_{k+l} \to 0, \tag{2.41}$$

wobei

$$\Delta x = \frac{x_k - x_0}{k}\ ;\ \Delta y = \frac{y_l - y_0}{l}\ ;\ |\Delta x| = \Delta y| = 1;\ k,\ l \in N.$$

Schrittzahl $n = k + l$; interpolierte Zwischenwerte $n - 1$.

Ähnlich Gl. (2.37) wird bei einem Schritt in x- bzw. y-Richtung die Abweichung vom Funktionswert 0 nach der exakten Formel

$$\begin{aligned}(\Delta f)_x &= f(x \pm 1, y) - f(x, y) = \pm 2\,(x - x_m) + 1\\ (\Delta f)_y &= f(x, y \pm 1) - f(x, y) = \pm 2\,(y - y_m) + 1.\end{aligned} \tag{2.42}$$

Diese Differenz ist beim Kreis *nicht* mehr identisch mit der Abweichung durch die Interpolationsformel, sondern es ergibt sich für die Veränderung des Entscheidungsoperators D_{k+l} im k. Schritt in x-Richtung bzw. l. Schritt in y-Richtung:

$$\begin{aligned}\Delta D_{xk} &= D_{k+l} - D_{(k-1)+l} = \sum_{i=0}^{k-1} (x_i - x_m)\,\Delta x - \sum_{i=0}^{k-2} (x_i - x_m)\,\Delta x\\ &= -\Delta x\,(x_m - x_{k-1})\end{aligned} \tag{2.43}$$

$$\Delta D_{yl} = D_{k+l} - D_{k+(l-1)} = -\Delta y\,(y_m - y_{l-1}).$$

Der Operator D_{k+l} entscheidet über den nächsten Schritt. Verschwindet er, muß wegen der mathematischen Näherung der Punkt nicht auf dem Kreis liegen. Die Interpolation ist nicht geschlossen ausführbar, da die Vorzeichen nur für einen Quadranten gelten (Tafel 2.3, Bild 2.22).

Da die ΔD stets unterschiedliche Vorzeichen aufweisen, gestattet geeignete Schrittwahl, D_{k+l} gegen 0 zu führen.

[1]) $\int_a^b y\,\mathrm{d}x \approx \frac{b-a}{n}\,[y(a) + y_1 + y_2 + \quad + y_{n-1}]$

Tafel 2.3. Vorzeichenfestlegung bei Kreisinterpolation (Gegenuhrzeigersinn)

		I	II	III	IV	
	x_m	<0	>0	>0	<0	unabhängig von Bewegungsrichtung
	y_m	<0	<0	>0	>0	
Vorzeichen	Δx	—	—	+	+	bei Rechtslauf Vorzeichen tauschen
	Δy	+	—	—	+	
	$\Delta D_{xk} = \Delta x\,(-x_m)$	<0	>0	<0	>0	
	$\Delta D_{yl} = \Delta y\,(-y_m)$	>0	<0	>0	<0	

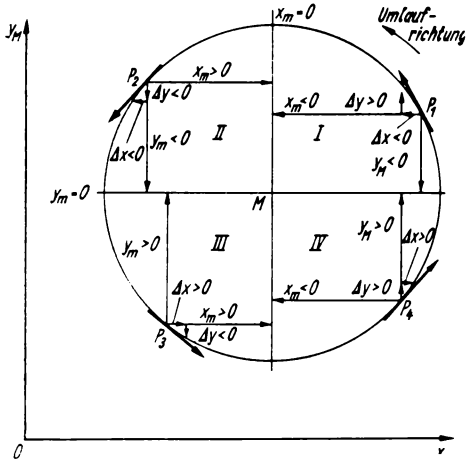


Bild 2.22. Vorzeichenfestlegung Kreisinterpolation

Eine weitere Näherung bei vergrößertem Fehler, indem ein D_{k+l} mit falschem Vorzeichen in den nächsten Quadranten verschleppt wird, ist die Umwandlung der Interpolationsformel Gl. (2.41) in

$$\left|\sum_{i=0}^{k-1}(x_i - x_m)\,\Delta x\right| - \left|\sum_{j=0}^{l-1}(y_j - y_m)\,\Delta y\right| = D_{k+l}. \tag{2.44}$$

Kriterien: $D_{k+l} \leqq 0 \rightarrow x$-Schritt,

$D_{k+l} > 0 \rightarrow y$-Schritt.

Dadurch geht die obige Quadrantenkennzeichnung verloren.

Zur Festlegung der Vorschubgeschwindigkeit ist der Zeitparameter einzuführen,

f_J Rechenfrequenz des Interpolators

$$\left.\begin{aligned} v_x &= \Delta x \frac{i}{i+j} f_J \\ v_y &= \Delta y \frac{j}{i+j} f_J \end{aligned}\right\} \quad \text{mit } |\Delta x| = |\Delta y| = 1$$

$$v_T = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{\frac{i^2+j^2}{(i+j)^2}} f_J$$

$$= \frac{f_J}{i+j}\sqrt{i^2+j^2},$$

daraus die Extremwerte für $i = 0$ oder $j = 0$.

$$v_{0,90°} = f_J \frac{\text{Einheitsschritte}}{\text{s}} = v_{\max}$$

und $i = j$

$$v_{45°} = \frac{f_J \cdot i}{2i}\sqrt{2} = \frac{f_J}{\sqrt{2}} \frac{\text{Einheitsschritte}}{\text{s}} = v_{\min}.$$

Die Geschwindigkeitsschwankung beträgt somit maximal

$$v_{90°} : v_{45} = f_J : f_J/\sqrt{2} = \sqrt{2} : 1. \tag{2.45}$$

Die Verwendung der Trapezformel[1]) für Gl. (2.40) liefert eine bessere Näherung als die Treppenkurve:

$$\int_{x_0}^{x} (x - x_m)\,\mathrm{d}x$$

$$\approx \frac{x_k - x_0}{2k}[(x_0 - x_m) + 2(x_1 - x_m) + \cdots + (x_k - x_m)]$$

$$= \sum_{i=1}^{k} (x_i - x_m)\,\Delta x + \frac{\Delta x}{2}(x_0 - x_k).$$

Interpolationsformel:

$$\sum_{i=1}^{k} (x_i - x_m)\,\Delta x - \frac{1}{2} k (\Delta x)^2$$

$$+ \sum_{j=1}^{l} (y_j - y_m)\,\Delta y - \frac{1}{2} l (\Delta y)^2 = D_{k+l} \to 0 \tag{2.46}$$

$$= \sum_{i=1}^{k} \Delta D_{xi} + \sum_{j=1}^{i} \Delta D_{yj}$$

[1]) $\int_a^b y\,\mathrm{d}x \approx \frac{b-a}{2n}[y(a) + 2y_1 + 2y_2 + \cdots + 2y_{n-1} + y(b)]$

mit

$$\Delta x = \frac{x_k - x_0}{k}\ ;\ \Delta y = \frac{y_l - y_0}{l}\ ;\ n = k + l;\ i, j, k, l \in N$$

$$\Delta D_{xk} = (x_k - x_m)\,\Delta x - \frac{1}{2}(\Delta x)^2 \tag{2.47}$$

$$\Delta D_{yl} = (y_l - y_m)\,\Delta y - \frac{1}{2}(\Delta y)^2.$$

Im Gegensatz zu Gl. (2.43) wird der Zuwachs des Entscheidungsoperators von der *nach* dem Schritt aktuellen Koordinate gebildet.

Aus der Identität der Lösung der Integrale aus Gl. (2.40)

$$\int_{x_0}^{x_k} (x - x_m)\,\mathrm{d}x = \frac{1}{2}(x_k^2 - 2\,x_k\,x_m - x_0^2 + 2\,x_0\,x_m)$$

mit der Näherung der Interpolationsformel nach Gl. (2.46)

$$\sum_{i=1}^{k} (x_i - x_m)\,\Delta x - k\,\frac{(\Delta x)^2}{2} = \left(k\,\frac{x_1 + x_k}{2} - k\,x_m\right)\frac{x_k - x_0}{k}$$

$$- \frac{k}{2}\,\frac{x_k - x_0}{k}\cdot\frac{x_k - x_0}{k}$$

$$= \frac{1}{2}(x_k^2 - 2\,x_k\,x_m - x_0^2 + 2\,x_0\,x_m) \text{ mit } \frac{x_k - x_0}{k} = x_1 - x_0$$

geht hervor, daß die Trapeznäherung keinen systematischen Fehler ergibt.

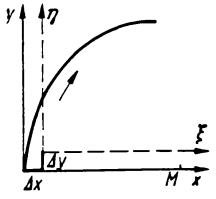


Bild 2.23. Koordinatentransformation nach 2 Schritten

Legt man den Ursprung bei der Kreisinterpolation auch in den Anfangspunkt und transformiert dauernd das Koordinatensystem $(\xi; \eta)$ (Bild 2.23), werden x_m und y_m laufende Koordinaten und $x_{k-1} = 0$, $y_{l-1} = 0$:

$$\langle x_m \rangle := \langle x_m \rangle - \Delta x \Rightarrow \langle x_m \rangle \tag{2.48}$$

$$\langle x_e \rangle := \langle x_e \rangle - \Delta x \Rightarrow \langle x_e \rangle, \tag{2.49}$$

desgl. in y-Richtung.

Aus Gl. (2.43) wird

$$\Delta D_{xk} = -\,x_m\,\Delta x;\ \Delta D_{yl} = -\,y_m\,\Delta y\,. \tag{2.50}$$

Beispiel (Bild 2.24):

I. Quadrant (bezogen auf M)

Lt. Tafel 2.3 ist dort

$$x_m < 0;\ y_m < 0$$
$$\Delta x = -1;\ \Delta y = +1$$
$$\Delta D_{xk} < 0;\ \Delta D_{yl} > 0$$

Ausgangswerte: $x_m = -6;\ y_m = 0$

$x_e = -6;\ y_e = +6$

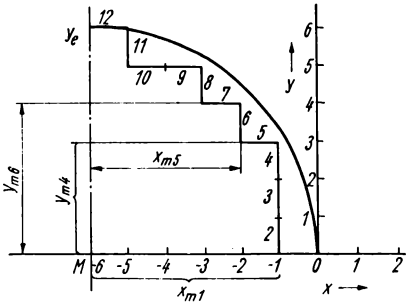


Bild 2.24. Beispiel

Schritt $l+k$	Achsrichtung	$\langle x_m\rangle - \Delta x \Rightarrow \langle x_m\rangle$ Gl. (2.48)	$\Delta D_{xk} = -x_m \Delta x$ Gln. (2.50)	x_e (2.49)	$\langle y_m\rangle - \Delta y \Rightarrow \langle y_m\rangle$ Gl. (2.48)	$D_{yl} = -y_m \Delta y$ Gln. (2.50)	y_e (2.49)	$D_{k+l} + \Delta D \Rightarrow D_{k+l}$
1	Δx	$-6-(-1)=-5$	$5(-1)=-5$	-5				$0-5=-5$
2	Δy				$0-1=-1$	$1\cdot 1=1$	5	$-5+1=-4$
3	Δy				$-1-1=-2$	$2\cdot 1=2$	4	$-4+2=-2$
4	Δy				$-2-1=-3$	$3\cdot 1=3$	3	$-2+3=+1$
5	Δx	$-5+1=-4$	$4(-1)=-4$	-4				$1-4=-3$
6	Δy				$-3-1=-4$	$4\cdot 1=4$	2	$-3+4=1$
7	Δx	$-4+1=-3$	$3(-1)=-3$	-3				$1-3=-2$
8	Δy				$-4-1=-5$	$5\cdot 1=5$	1	$-2+5=3$
9	Δx	$-3+1=-2$	$2(-1)=-2$	-2				$3-2=1$
10	Δx	$-2+1=-1$	$1(-1)=-1$	-1				$1-1=0$
11	Δy				$-5-1=-6$	$6\cdot 1=6^*$	0	$0+6=6$
12	Δx	$-1+1=0$	0	0				$6-0=6$

* Beginn des Endzyklus

Aus Gl. (2.36) für Geradeninterpolation

$$\Delta D_{xk} = -y_e \Delta x; \quad \Delta D_{yl} = +x_e \Delta y$$

und Gl. (2.50) für Kreisinter polation

$$\Delta D_{xk} = -x_m \Delta x; \quad \Delta D_{yl} = -y_m \Delta y$$

wird klar:

Der Kreisinterpolator wird zum Linearinterpolator durch Vertauschen der Achszuordnung und Vorzeichenwechsel.

Letzteres ist wegen des Vorschubs entweder in Normalen- oder in Tangentenrichtung (Bild 2.25) nötig, da

$$\operatorname{sgn} x_e = \operatorname{sgn} x_m; \ \operatorname{sgn} y_e = \operatorname{sgn} y_m. \tag{2.51}$$

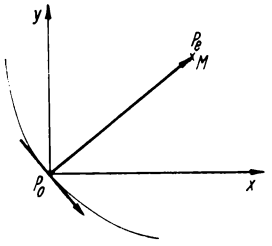


Bild 2.25. Linear-, Zirkularinterpolation, Vergleich

Zum Beispiel ist Gl. (2.51) erfüllt für den I. Quadranten linearer und III. Quadranten zirkularer Interpolation, d.h. Δx positiv, Δy linear positiv, zirkular negativ.

Die Bilder 2.26 und 2.27 zeigen die Programmablaufpläne (PAP) mit jeweils zwei konstanten Schritten am Anfang.

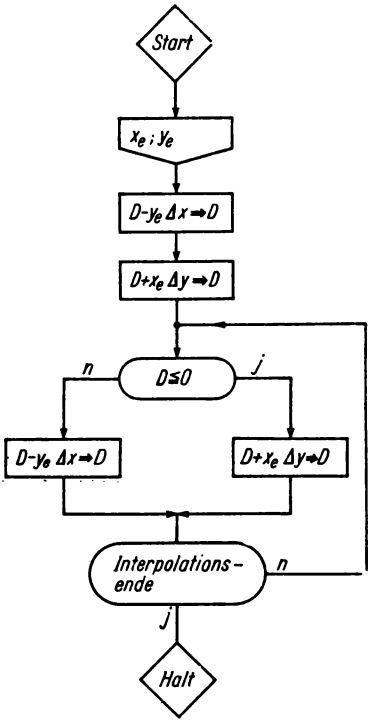
Die Genauigkeit [2.21] der Rechtecknäherung zeigt

- verfahrensbedingte Fehler der Näherung (Systemfehler)
- Vorzeichenfehler beim Quadrantenwechsel
- Quantisierungsfehler.

Untersuchungen bestätigen, daß der Kreis aufgebogen wird,

$$\Sigma \Delta R = R(\varphi) - R > 0, \text{ wobei } R(\varphi) \approx k \cdot \varphi.$$

- Verfahrensbedingter Fehler (Bild 2.28)
  $(\Delta R)_1 \leqq 1/\text{Quadrant}$, unabhängig von R
- Fehler durch den Registerrest beim Quadrantenwechsel
  $(\Delta R)_2 \leqq 1/\text{Quadrant}$
- Fehler durch Digitalisierung $(\Delta R)_3 \leqq 1$.



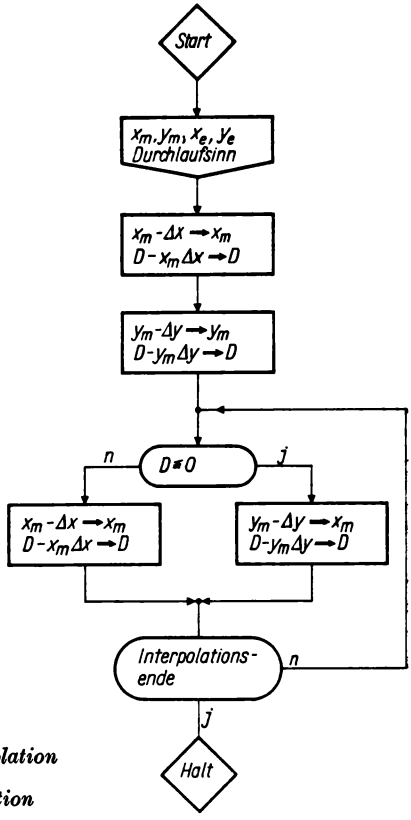


Bild 2.26. Flußdiagramm Geradeninterpolation

Bild 2.27. Flußdiagramm Kreisinterpolation

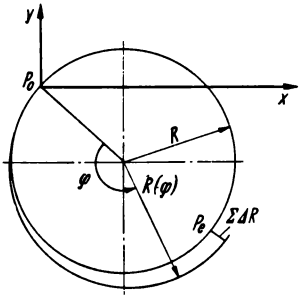


Bild 2.28. Kreisaufbiegung

Innerhalb eines Quadranten wird $(\Delta R)_1 + (\Delta R)_3 \leqq 2$ Rechenschritte, beim Vollkreis ohne Zwischenstützung

$$4 \leqq \sum_{i=1}^{3} (\Delta R)_i \leqq 9 \text{ Rechenschritte.} \tag{2.52}$$

(Dagegen ergab das DDA-Verfahren 0,8 + 1 Rechenschritte/Quadrant). Da 1 Rechenschritt < 1 Weginkrement sein kann, sind bei beiden Verfahren die Fehler der Interpolation beliebig klein zu halten.

Ein Vergleich beider Kreisinterpolationen zeigt, daß die Bahn-(Tangential-) Geschwindigkeit beim DDA-Verfahren konstant ist, beim Verfahren direkter Funktionsberechnung ohne Korrektur im Verhältnis $1:\sqrt{2}$ schwankt.

2.5.4. Analog-Interpolation [2.19] [2.22]

Zuweilen werden Parabelinterpolationen analog ausgeführt, da sich diese einfach realisieren lassen. Die mathematische Grundlage bildet die Interpolationsformel nach *Newton* [2.13] mit konstantem Stützpunktabstand $h = x_i - x_{i-1}$.

$$y = y_1 + \frac{\Delta y_{21}(x - x_1)}{1!\,h} + \frac{\Delta^2 y_{31}(x - x_1)(x - x_2)}{2!\,h^2} + \cdots, \tag{2.53}$$

wobei $\Delta y_{21} = y_2 - y_1$

$\Delta y_{32} = y_3 - y_2$ Differenzen 1. Ordnung

$\Delta^2 y_{31} = \Delta y_{32} - \Delta y_{21}$ Differenz 2. Ordnung.

Mit dem Zeitparameter t wird

$$x(t) = x_1 + t\,h = a_0 + a_1 t$$

$$y(t) = y_1 + \binom{t}{1}\Delta y_{21} + \binom{t}{2}\Delta^2 y_{31} = b_0 + b_1 t + b_2 t^2. \tag{2.54}$$

Da keine der Achsen bei beliebiger Lage der Kurve bevorzugt werden darf, ist die doppelt parabolische Interpolationsformel anzusetzen [1.1].

$$\begin{aligned} x(t) &= a_0 + a_1 t + a_2 t^2 \\ y(t) &= b_0 + b_1 t + b_2 t^2 . \end{aligned} \tag{2.55}$$

Gl. (2.55) wird mit der Anordnung gemäß Bild 5.71 erfüllt.

2.6. Codierung der Eingangsinformationen

2.6.1. Allgemeines

Die vom Menschen in gedanklichen Prozessen erarbeiteten Anweisungen sind in einer von Automaten lesbaren, zum Datentransport und zur Fehlersicherung geeigneten Weise darzustellen. Die dazu gebrauchte Zuordnung (Codierung) muß eine eindeutige Abbildung des Zeichenvorrats der Eingangsmenge $X \in A_1$ auf eine Bildmenge $Y \in A_2$ sein, wobei die Alphabete A_i unterschiedliche Anzahl von Symbolen aufweisen können. Der Transformationsoperator heißt Code.

Unter Code wird bisweilen auch nur der Vorrat der Codewörter als Bildmenge der Abbildung verstanden.

Für die NC besteht das der Umgangssprache entlehnte Quellenalphabet A_1 (die Information) aus

den 10 Ziffern	0 bis 9	
den 26 Buchstaben	A bis Z	
etwa 20 Sonderzeichen, z. B. +, —, %, Tab usw.		} Alphazeichen,

und seine Darstellung erfordert einen alphanumerischen Code. Den etwa 60 Zeichen der Eingangsmenge stehen nur die Binärzeichen 0, L als Minimum eines Informationsparameters der Bildmenge gegenüber, durch deren Kombination zu 8-bit-Zeichen ($\triangleq$ 1 Byte) man die gleiche Mächtigkeit erhält. Für die innere Datenverrechnung genügen numerische Codes gemäß Abschn. 2.4.

Die zu speichernde bzw. zu transportierende Information wird unter Beachtung der Syntax durch Zeichenkombination zu Wörtern (geordnete Folge von Zeichen) und Zusammenfügen mehrerer Wörter zu Sätzen (Datensätze, Programmsätze) gewonnen. Für einen Arbeitsabschnitt ist die Eingabe eines Satzes nötig.

Betrachtet man das Alphabet A_1 als „natürlichen", gewohnten Ausgangspunkt, spricht man bei seiner Transformation in Binärkombinationen von Codierung bzw. Umcodierung (z. B. 5 → 0 L 0 L) und nennt den umgekehrten Vorgang Decodierung, z. B. BCD → 1 aus 10 $[\binom{10}{1}]$.

Zur Darstellung von $\leqq 63$ Symbolen des Quellenalphabets in binärer Form benötigt man $H_0 = \mathrm{ld}\ 64 = 6$ bit – das leere Zeichen ist unzulässig –, die minimalen Aufwand ergeben. Fehlbearbeitung bei falscher Erkennung ist nicht auszuschließen. Derartige Codes ohne Redundanz sind ungesichert.

Redundant sind alle Informationen, die zu ihrer Kennzeichnung mehr als die minimal benötigte Informationsmenge verwenden. Redundanz und ökonomische Minimierung sind formal betrachtet gegensätzliche Forderungen. Beispielsweise ist die Information „Freitag, 15. November 1974" redundant, weil die Aussage „15. 11. 74" die gleiche, unzweideutige Nachricht mit größerem Übermittlungsrisiko darstellt.

Jede Umgangssprache weist so viel Redundanz auf, daß selbst das Verstümmeln mehrerer Buchstaben keinen Informationsverlust bedeuten muß. Man beachte aber: Auch Redundanz schützt nicht vor falschen Primärdaten.

Bei gesicherten Binärcodes unterscheiden sich zwei zulässige Tupel (meist Bytes) in mehr als einer Stelle (Hammingabstand d).

Im geometrischen Modell wird jeder Kante eine Binärstelle zugeordnet (Bild 2.29 für 3 bit), die größte Sicherheit ist bei maximalem Kantenabstand gegeben.

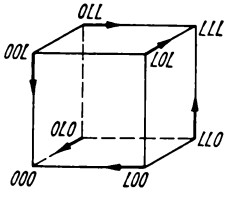


Bild 2.29. Hammingabstand

Daraus leitet sich ab

ungesichert	$d = 1$ (000; 00L; LL0; 0LL usw.)
zur Fehlererkennung	$d = 2$ (000; LL0; 0LL; L0L)
zur Fehlerkorrektur	$d = 3$ (000; LLL).

Allgemein sind $d - 1$ Fehler erkennbar. Näheres s. [2.5]. Mit der guten Qualität der Lochstreifenleser und exakter Programmierung genügt zur Fehlererkennung die Kontrolle auf Zulässigkeit des Einzelzeichens durch Paritätsprüfung, eine Syntaxprüfung (Wortlänge) entfällt normalerweise. Codes mit $d = 3$ lassen

Fehlerkorrekturen zu, wenn nur ein Fehler im Zeichen angenommen wird. Im Bild 2.29 (Redundanz 75%) verläuft die Korrektur in Pfeilrichtung nach den beiden zulässigen Werten 0 0 0 und L L L.

In der NC sind Codes mit 8 bit je Zeichen üblich, wobei 6 oder 7 bit der Informationskennzeichnung und 1 bit ihrer Sicherung dienen. Neben den beiden eingeführten Lochstreifencodes EIA und ISO-7-bit hat es nicht an weiteren Vorschlägen gefehlt, z. B. 8A-Code der AEG; 8C-Code der WMW; Hammingcode, die sich gegenüber den über die Schreibautomaten eingeführten erwähnten Codes sogar durch Sicherheit und Übersichtlichkeit auszeichnen; der Vorlauf der Büromaschinenindustrie gab jedoch den Ausschlag.

2.6.2. ISO-7-bit-Code (Tafel 2.4, s. S. 62—65)

Von der „International Standardization Organisation" wurde der ISO-7-bit-Code empfohlen (ISO/R 1058—1969), dem sich auch alle RGW-Staaten angeschlossen haben (TGL 23207/01). Auf dem Informationsgehalt des Codes von $2^7 - 1 = 127$ bit werden 49 Zeichen (große Buchstaben) zur Steuerung von NCM (TGL 200-0862) verwendet. Die Informationen liegen in den Spuren 1 bis 7 (1 bis 4 Befehlsbit, 5 bis 7 Zonenbit), die Spur 8 trägt das Paritätsbit, wobei auf Geradzahligkeit ergänzt wird und Einerfehler im Zeichen durch den Hammingabstand 2 erkennbar sind.
Dieser Code ist vorzugsweise anzuwenden.

2.6.3. EIA-Code (Tafel 2.4, s. S. 62—65)

Dieser Code wurde 1961 als EIA-Standard RS 244 veröffentlicht (EIA Electronic Industries Association) und hat weite Verbreitung gefunden. Sein benutzter Vorrat beträgt auch 49 Zeichen (kleine Buchstaben), die in den 6 Informationsspuren 1 bis 4, 6 und 7 codiert sind.

Beim EIA-Code ist die Anzahl der Lochungen ungeradzahlig (Paritätsbit in der 5. Spur, Hammingabstand 2). In der 8. Spur ist nur das Bit für Wagenrücklauf (Satzende) gesetzt.

Im EIA-Standard RS 273 ist die Bedeutung der Adressen für Punkt- und Streckensteuerungen, in RS 274 für Punkt-Strecken- und Bahnsteuerungen zugeordnet.

Eine Untermenge aus dem EIA-Code von 32 Zeichen (Zuordnung VDI-Richtlinie 3256) wurde im 8B-Code (VDI-Richtlinie 3259) ausgewählt, der in der DDR für neue Steuerungen nicht mehr zugelassen ist.

2.6.4. Programmaufbau

Der Programmaufbau für NC ist in TGL 200-0863/01 bis /08 vorgeschrieben. Darin ist definiert:
Ein Programm ist eine festgelegte, geeignete Folge von Arbeitsinformationen, die aus Programmsätzen mit mehreren Programmwörtern bestehen. Es kann in Programmabschnitte zerlegt sein, an deren Anfang ein Hauptsatz mit allen für eine Bearbeitungsoperation erforderlichen Informationen steht. Die Nebensätze enthalten nur Korrekturen und Ergänzungen des Hauptsatzes. Das Programmwort ist eine Zeichenfolge für einen Befehl (z.B. y-1234 oder m 01).

Allgemein wird in Adressenschreibweise (Adresse, Vorzeichen, Ziffer) gearbeitet, wodurch Wiederholungen vermeidbar sind. Bei der Tabulatorschreibweise (TAB sequential) dagegen ist jedem Programmwort ein fester Platz im Programmsatz zugeordnet (auch als Lochband-Blocksystem bekannt), wodurch sich nicht ändernde Informationen zu wiederholen sind.

Ein eingeschränkter Informationsgehalt eines Satzes wird durch einen Blockleser (Satzleser) bzw. ein Schrittschaltwerk statisch (parallel) angeboten.

Die programmkennzeichnenden Informationen sind (Details s. TGL 200-0863, s. a. Tafel 2.4)

Programmanfang (vorher stehende Information wird überlesen)

Satzende

Anmerkung (eingeschlossene Information wird überlesen)

Hauptsatz

Satzunterdrückung

Wortfolge:

Satznummer	3stellig, feste Wortlänge
Wegbedingung	TGL 200-0863/05 (s.a. Tafel 2.6)
Koordinaten	Angabe in mm oder dezimalen Bruchteilen
Vorschub	unmittelbar nach der Koordinate oder einer Koordinatengruppe anzuordnen; TGL 200-0863/06
Drehzahl	Schlüsselzahlen TGL 200-0863/06 oder direkt programmiert
Werkzeugnummer	
Zusatzfunktionen	TGL 200-0863/04 (s.a. Tafel 2.5).

2.6.5. Interpolation

Wegbedingungen legen die Interpolationsart fest. Die Koordinaten der Kurvenpunkte werden in einem Satz programmiert, Wiederholung des Endpunktes des vorherigen Satzes ist nicht nötig.

Die Interpolationsparameter *I*, *J*, *K* kennzeichnen keine Kurvenpunkte, sondern Kreismittelpunkt, Parabelbrennpunkt, Radius usw.

Ein Geradenstück kann absolut (auf den Nullpunkt bezogen) oder relativ (auf den Anfangspunkt der Geraden bezogen) in den zwei bzw. drei Koordinatenachsen programmiert werden.

Bei Kreisinterpolation sind in einem Satz vorzugeben:

- Koordinaten des Endpunktes des Kreisbogens (absolut/relativ)

Tafel 2.4. Codes

ISO-Code, TGL 200-0862										EIA-Code (RS 244)								RS 273
Kanalbelegung									Zuordnung	Kanalbelegung							IBM Zeichen	Zuordnung
S	7	6	5	4	3	2	1					6	5	4	3	2	1		
	64	32	16	8	4	2	1		Bedeutung laut TGL 200-0863/03	64	32	16		8	4	2	1		Bedeutung
		●	●		●			0	Dezimalziffer 0			●			●			0	Dezimalziffer 0
●		●	●		●		●	1	Dezimalziffer 1						●		●	1	Dezimalziffer 1
●		●	●		●	●		2	Dezimalziffer 2						●	●		2	Dezimalziffer 2
		●	●		●	●	●	3	Dezimalziffer 3				●		●	●	●	3	Dezimalziffer 3
●		●	●		●			4	Dezimalziffer 4						●			4	Dezimalziffer 4
		●	●		●		●	5	Dezimalziffer 5				●		●		●	5	Dezimalziffer 5
		●	●		●	●		6	Dezimalziffer 6				●		●	●		6	Dezimalziffer 6
●		●	●		●	●	●	7	Dezimalziffer 7						●	●	●	7	Dezimalziffer 7
●		●	●	●	●			8	Dezimalziffer 8					●	●			8	Dezimalziffer 8

		●	●	●	●			●	9	**Dezimalziffer 9**				●	●	●			●	9	**Dezimalziffer 9**
					●											●					
	●				●			●	A	Drehbewegung um x-Achse		●	●			●			●	a	**Drehwinkelmaß um die x-Achse**
	●				●		●		B	Drehbewegung um y-Achse		●	●			●		●		b	**Drehwinkelmaß um die y-Achse**
●	●				●		●	●	C	Drehbewegung um z-Achse		●	●	●		●		●	●	c	**Drehwinkelmaß um die z-Achse**
	●				●	●			D	Drehbewegung um weitere Achse oder dritter Vorschub oder Werkzeugkorrektur		●	●			●	●			d	**Drehwinkelmaß um eine spezielle Achse oder 3. Vorschubfunktion**
●	●				●	●		●	E	Drehbewegung um weitere Achse oder zweiter Vorschub		●	●	●		●	●		●	e	**Drehwinkelmaß um eine spezielle Achse oder 2. Vorschubfunktion**
●	●				●	●	●		F	erster Vorschub		●	●	●		●	●	●		f	**Vorschubfunktion**
	●				●	●	●	●	G	Wegbedingung		●	●			●	●	●	●	g	**Ablaufwählfunktion**
	●			●	●				H	frei verfügbar		●	●		●	●				h	**nicht zugeordnet**
●	●			●	●			●	I	Interpolationsparameter oder Gewindesteigung parallel zur x-Achse		●	●	●	●	●			●	i	**nicht verwenden**
●	●			●	●		●		J	Interpolationsparameter oder Gewindesteigung parallel zur y-Achse		●		●		●			●	j	**nicht zugeordnet**

Tafel 2.4. Codes (Fortsetzung)

ISO-Code, TGL 200-0862										EIA-Code (RS 244)									RS 273
Kanalbelegung									Zuordnung	Kanalbelegung								IBM Zeichen	Zuordnung
8	7	6	5	4	3	2	1					6	5	4	3	2	1		
	64	32	16	8	4	2	1		Bedeutung laut TGL 200-0863/03	64	32	16		8	4	2	1		Bedeutung
	●			●	●	●	●	K	Interpolationsparameter oder Gewindesteigung parallel zur z-Achse		●		●		●	●		k	nicht zugeordnet
●	●			●	●			L	Information für Adaptive Regelung (AC)		●				●	●	●	l	nicht verwenden
	●			●	●		●	M.	Zusatzfunktion		●		●		●			m	Funktion des Ein- und Aus-Typs
	●			●	●	●		N	Satznummer		●				●		●	n	Satznummer
●	●			●	●	●	●	0	(nicht verwenden)		●				●	●		0	nicht verwenden
		●	●	●	●	●		:	Hauptsatz, bedingter Stopp bei Lochbandrücklauf		●	●		●	●	●	●	•	Punkt oder Multiplikationszeichen
	●		●		●			P	dritte Bewegung parallel zur x-Achse oder Parameter für Wz.-Korrektur		●		●		●	●	●	p	3. Eingangsdimension oder tertiäre Beweg.-Dimensionierung parallel zur x-Achse
●	●		●		●		●	Q	dritte Bewegung parallel zur y-Achse oder Parameter für Wz.-Korrektur		●		●	●	●			q	2. Eingangsdimension oder tertiäre Beweg.-Dimensionierung parallel zur y-Achse
●	●		●		●	●		R	dritte Bewegung parallel zur z-Achse oder Parameter für Wz.-Korrektur		●			●	●		●	r	1. Eingangsdimension oder tertiäre Beweg.-Dimensionierung parallel zur z-Achse

	●		●		•		●	●	S	Drehzahl			●	●		•		●		s	Spindeldrehzahl
●	●		●		•	●			T	Werkzeug oder Werkzeugspeicherplatz			●			•		●	●	t	Werkzeugwahlfunktion
	●		●		•	●		●	U	zweite Bewegung parallel zur x-Achse			●	●		•	●			u	sekund. Beweg.-Dimensionierung parallel zur x-Achse
●		●		●	•	●	●	●	/	Satzunterdrückung			●	●		•			●	/	Teilstrich
	●		●		•	●	●		V	zweite Bewegung parallel zur y-Achse			●			•	●		●	v	sekund. Beweg.-Dimensionierung parallel zur y-Achse
●	●		●		•	●	●	●	W	zweite Bewegung parallel zur z-Achse			●			•	●	●		w	sekund. Beweg.-Dimensionierung parallel zur z-Achse
●	●		●	●	•				X	1. Bewegung in Richtung der x-Achse			●	●		•	●	●	●	x	primäre Beweg.-Dimensionierung in x-Richtung
	●		●	●	•			●	Y	1. Bewegung in Richtung der y-Achse			●	●	●	•				y	primäre Beweg.-Dimensionierung in y-Richtung
	●		●	●	•		●		Z	1. Bewegung in Richtung der z-Achse			●		●	•			●	z	primäre Beweg.-Dimensionierung in z-Richtung
		●		●	•		●	●	+	plus		●	●	●		•				+	Vorzeichen +
●		●			•	●		●	%	Programmanfang			●	●	●	•		●	●		Komma
		●		●	•	●		●	–	minus		●				•				–	Vorzeichen –

Tafel 2.4. Codes (Fortsetzung)

ISO-Code, TGL 200-0862										EIA-Code (RS 244)									RS 273
Kanalbelegung									Zuordnung	Kanalbelegung								IBM Zeichen	Zuordnung
8	7	6	5	4	3	2	1					6	5	4	3	2	1		
	64	32	16	8	4	2	1		Bedeutung laut TGL 200-0863/03	64	32	16		8	4	2	1		Bedeutung
●		●		●	●		●	)	Anmerkungsende		●	●	●	●	●			GB	Großbuchstaben
		●		●	●			(	Anmerkungsbeginn		●	●	●	●		●		KB	Kleinbuchstaben
●		●			●			SP	Zwischenraum				●		●			ZWR	Zwischenraum
				●	●		●	HT	Horizontaltabulator			●	●	●	●	●		TAB	Tabulator
●				●	●	●	●	CR	Wagenrücklauf	●					●			⟨=	Programmsatzende
●	●	●	●	●	●	●	●	DEL	Löschen		●	●	●	●	●	●	●	JRR	Irrung
					●									●	●	●	●	Ende	Ende der Aufzeichnung
●				●	●			BS	Rückwärtsschritt			●		●	●	●		RT	Rücktaste
					●			NUL	Leerzeichen						●			Bl	Bandlauf
				●	●	●		LF	Satzende									blank	blankes Band

- Interpolationsparameter, wie Koordinaten des Kreismittelpunktes (absolut oder auf P_0 bezogen) oder Radius, Winkel, Tangentenrichtung je nach Festlegung der NC (Bilder 2.30, 2.31) oder in zwei Sätzen, wenn der Kreis durch Anfangs- (nicht zu programmieren), Zwischen- (im ersten Satz) und Endpunkt (im zweiten Satz) festgelegt ist (Bild 2.32).

Parabelinterpolation

Details bei Parabelinterpolation s. TGL 200-0863/01. Vorzugeben sind in einem Satz Tangentenschnittpunkt und P_e (Bild 2.33) oder in zwei Sätzen Zwischen- und Endpunkt. Zur Werkzeugbahnkorrektur werden die Korrekturparameter P, Q, R eingegeben (z. B. Tangentenrichtung).

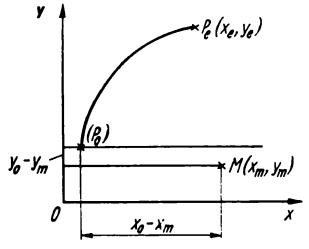


Bild 2.30
Kreisinterpolation, Angabe P_e, M

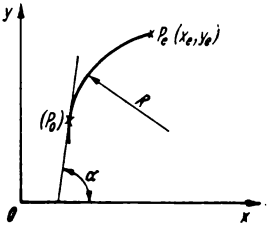


Bild 2.31
Kreisinterpolation, Angabe R, tan α, P_e

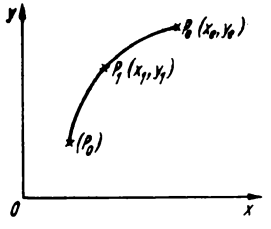


Bild 2.32
Kreisinterpolation, 3-Punkt-Angabe

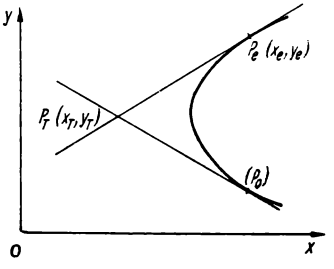


Bild 2.33
Parabelinterpolation

2.6.6. Zusatzfunktionen (M)

In TGL 200-0863/04 (erweitert gegenüber ISO R 1056) sind zusätzlich zur Bedeutung der M-Befehle (Tafel 2.5) noch deren Beginn und Dauer angegeben.

Tafel 2.5. Programmaufbau, Zusatzfunktionen M

Wort	TGL 200-0863/04 (Ausg. 1. 71)	EIA-Standard RS 273, Ausg. 1965	Bemerkungen
M 00	programmierter Halt	Programm Halt	Start von Hand
M 01	wahlweise Halt	wahlweise (geplant) Halt	
M 02	Programm-Ende	Programm Ende	
M 03	Spindel 1, Umdrehung im Uhrzeigersinn	Spindel im Uhrzeigersinn	
M 04	Spindel 1, Umdrehung gegen den Uhrzeigersinn	Spindel im Gegenuhrzeigersinn	
M 05	Spindel 1, Halt	Spindelumdrehung Halt	
M 06	Werkzeugwechsel	Werkzeugwechsel	
M 07	Kühl-(Schmier-)mittel 2 Ein	Kühlmittel 2 Ein	
M 08	Kühl-(Schmier-)mittel 1 Ein	Kühlmittel 1 Ein	
M 09	Kühl-(Schmier-)mittel Aus	Kühlmittel Aus	
M 10	Spannen, Klemmen	Klemmen	
M 11	Entspannen, Lösen	Klemmung lösen	
M 12	Programm-Anfang oder frei verfügbar	nicht zugeordnet	
M 13	Spindelumdrehung im Uhrzeigersinn, Kühl-(Schmier-)mittel Ein	Spindel im Uhrzeigersinn, Kühlmittel Ein	
M 14	Spindelumdrehung gegen den Uhrzeigersinn, Kühl-(Schmier-)mittel Ein	Spindel im Gegenuhrzeigersinn, Kühlmittel Ein	
M 15	Bewegung in positiver Richtung	Bewegung in + Richtung	
M 16	Bewegung in negativer Richtung	Bewegung in − Richtung	
M 17	Rufsignal oder frei verfügbar		manuell starten
M 18	Programmunterbrechung oder frei verfügbar		
M 19	Spindel Halt mit def. Endstellung	nicht zugeordnet	
M 20	frei verfügbar	nicht zugeordnet	
M 21			
M 22			
M 23			
M 24			
M 25		dauernd nicht zugeordnet	
M 26			
M 27			
M 28			
M 29			
M 30	Lochstreifenende evtl. mit Rücklauf	Streifenende	allein im Satz
M 31	Umgehung einer Verriegelung	Überbrückung einer Verriegelung	
M 32	konstante Schnittgeschwindigkeit	konstante Schnittgeschwindigkeit	
M 33			
M 34			
M 35			
M 36	Vorschubbereich 1	nicht zugeordnet	
M 37	Vorschubbereich 2		
M 38	Spindeldrehzahlbereich 1		
M 39	Spindeldrehzahlbereich 2		
M 40	Getriebeschaltinformation oder frei verfügbar	Getriebewechsel, sonst nicht zugeordnet	
M 41			
M 42			
M 43			
M 44			
M 45			
M 46	für steuerungsinterne Zwecke	für steuerungsinterne Zwecke	Programmabschnitt wiederholen
M 47			
M 48			
M 49			

Tafel 2.5. Programmaufbau, Zusatzfunktionen M (Fortsetzung)

Wort	TGL 200-0863/04 (Ausg. 1. 71)	EIA-Standard RS 273, Ausg. 1965	Bemerkungen
M 50	Kühl-(Schmier-)mittel 3 Ein		
M 51	Kühl-(Schmier-)mittel 4 Ein		
M 52	Spindel 2, Umdrehung im Uhrzeigersinn		
M 53	Spindel 2, Umdrehung gegen den Uhrzeigersinn		
M 54	Spindel 2, Halt		
M 55	translatorische Werkzeugverschiebung, Stellung 1		
M 56	translatorische Werkzeugverschiebung, Stellung 2		
M 57	frei verfügbar		
M 58			
M 59			
M 60	Werkzeugwechsel		
M 61	translatorische Werkzeugverschiebung, Stellung 1		
M 62	translatorische Werkzeugverschiebung, Stellung 2		
M 63	frei verfügbar		
M 64			
M 65			
M 66			
M 67			
M 68	Werkzeug spannen		
M 69	Werkzeug entspannen		
M 70	frei verfügbar	nicht zugeordnet	Tischlage 0°
M 71	rotatorische Werkzeugverschiebung, Stellung 1		Tischlage 90°
M 72	rotatorische Werkzeugverschiebung, Stellung 2		Tischlage 180°
M 73	frei verfügbar		Tischlage 270°
M 74			
M 75			
M 76			
M 77			
M 78	Klemmen, vorzugsweise Tischklemmen Ein		
M 79	Lösen, vorzugsweise Tischklemmung lösen		
M 80	frei verfügbar		
M 81			
M 82			
M 83			
M 84			
M 85			
M 86			
M 87			
M 88			
M 89			
M 90			
M 91			
M 92	Drehzahl- (Vorschub-) Korrektur oder frei verfügbar		
M 93			
M 94			
M 95			
M 96			
M 97			
M 98			
M 99			

Tafel 2.6. Programmaufbau, Wegbedingungen G

Wort	Benennung nach TGL 200-0863/05 (Ausg. 7. 71)	Gruppeneinteilung	EIA-Standard RS 273 (1965)
G 00	Punkt-zu-Punkt-Positionierung	A	
G 01	Geradeninterpolation, mittlere Maße	A	für Bahnsteuerungen reserviert
G 02	Kreisinterpol. im Uhrzeigersinn, mittl. Maße	A	
G 03	Kreisinterpol. gegen den Uhrzeigersinn, mittlere Maße	A	
G 04	Verweilzeit, zeitlich vorbestimmt	●	Stillstandspause
G 05	Verweilzeit, zeitlich nicht vorbestimmt	●	Halt
G 06	frei verfügbar	●	nicht zugeordnet
G 07		●	nicht zugeordnet
G 08	Beschleunigung (schneller)	●	nur für Bahnsteuerung reserviert
G 09	Verzögerung (langsamer)	●	nur für Bahnsteuerung reserviert
G 10	Geradeninterpolation, große Maße	A	für Bahnsteuerung reserviert
G 11	Geradeninterpolation, kleine Maße	A	
G 12	Interpolationsraum $X\,YZ$	C	
G 13	Achsauswahl	B	Achsenauswahl
G 14		B	Achsenauswahl
G 15	Achsauswahl	B	Achsenauswahl
G 16		B	Achsenauswahl
G 17	Wahl der xy-Ebene (Interpolationsebene xy)	C	für Bahnsteuerung reserviert
G 18	Wahl der xz-Ebene (Interpolationsebene xz)	C	
G 19	Wahl der yz-Ebene (Interpolationsebene yz)	C	
G 20	Kreisinterpol. im Uhrzeigersinn, gr. Maße	A	für Bahnsteuerung reserviert
G 21	Kreisinterpol. im Uhrzeigersinn, kl. Maße	A	für Bahnsteuerung reserviert
G 22	gekoppelte Bewegung, positiv (Mitschleppen)	●	nicht zugeordnet
G 23	gekoppelte Bewegung, negativ (Mitschleppen)	●	
G 24	Bezugsmaßeingabe	D	
G 25	Kettenmaßeingabe	D	dauernd nicht zugeordnet
G 26	frei verfügbar		
G 27			
G 28			
G 29			
G 30	Kreisinterpol. gegen den Uhrzeigers., gr. Maße	A	nur für Bahnsteuerung reserviert
G 31	Kreisinterpol. gegen den Uhrzeigers., kl. Maße	A	
G 32	frei verfügbar		
G 33	Gewindeschneiden, konst. Steigung	A	Gewindeschneiden konst. Steigung
G 34	Gewindeschneiden, zunehmende Steigung	A	nur für Bahnsteuerung reserviert
G 35	Gewindeschneiden, abnehmende Steigung	A	nur für Bahnsteuerung reserviert
G 36	für steuerungsinterne Zwecke		für steuerungsinterne Zwecke
G 37			
G 38			
G 39			
G 40	Löschen der Befehle 41 bis 52	E	nur für Bahnsteuerung reserviert
G 41	Werkzeugkorrektur links	E	
G 42	Werkzeugkorrektur rechts	E	
G 43	Werkzeugkorrektur positiv oder frei verfügbar	E	
G 44	Werkzeugkorrektur negativ	E	
G 45	Werkzeugkorrektur $+/+$	E	nur für Bahnsteuerung reserviert
G 46	Werkzeugkorrektur $+/-$	E	
G 47	Werkzeugkorrektur $-/-$	E	
G 48	Werkzeugkorrektur $-/+$	E	
G 49	Werkzeugkorrektur $0/+$	E	

Tafel 2.6. Programmaufbau, Wegbedingungen G (Fortsetzung)

Wort	Benennung nach TGL 200-0863/05 (Ausg. 7. 71)	Gruppeneinteilung	EIA-Standard RS 273 (1965)
G 50	Werkzeugkorrektur 0/−	E	nicht zugeordnet
G 51	Werkzeugkorrektur +/0	E	
G 52	Werkzeugkorrektur −/0	E	
G 53	Löschen der Befehle 54 – 59	F	
G 54	translatorische Verschiebung *X*	F	
G 55	translatorische Verschiebung *Y*	F	
G 56	translatorische Verschiebung *Z*	F	
G 57	translatorische Verschiebung *X Y*	F	
G 58	translatorische Verschiebung *XZ*	F	
G 59	translatorische Verschiebung *YZ*	F	
G 60	genaue Positionierung 1	H	
G 61	genaue Positionierung 2	H	
G 62	Schnellhalt	H	
G 63	Gewindeschneiden	●	
G 64	Geschwindigkeitswechsel	●	
G 65	verfügbar für Positionieraufgaben	J	
G 66		J	
G 67		J	
G 68		L	
G 69		L	
G 70		M	
G 71		M	
G 72		M	
G 73		M	
G 74		M	
G 75		M	
G 76		M	
G 77		N	
G 78		N	
G 79		N	
G 80	Löschen der Befehle 81 bis 89	J	Löschen der Unterprogramme
G 81	fester Zyklus	J	Unterprogramm 1
G 82		J	Unterprogramm 2
G 83		J	Unterprogramm 3
G 84		J	Unterprogramm 4
G 85		J	Unterprogramm 5
G 86		J	Unterprogramm 6
G 87		J	Unterprogramm 7
G 88		J	Unterprogramm 8
G 89		J	Unterprogramm 9
G 90	Interpolation durch Kurven höherer Ordnung oder frei verfügbar	K	nicht zugeordnet
G 91		K	
G 92		K	
G 93		K	
G 94		K	
G 95	frei verfügbar	K	
G 96		K	
G 97		K	
G 98		K	
G 99		K	

2.6.7. Wegbedingungen (G)

In TGL 200-0863/05 (s. a. Tafel 2.6) sind die einander ausschließenden Wörter mit gleichen Buchstaben, die nur für einen Satz wirkenden mit ● gekennzeichnet. Empfohlene feste Zyklen (Unterprogramme) sind

G 81 Bohren, Zentrieren
G 82 Bohren, Einstechen, mit Verweilzeit
G 83 tiefes Bohren mit Ausspänen (intermittierende Rückbewegung)
G 84 Gewindeschneiden
G 85 Aufbohren
G 86 Aufbohren, Rücklauf bei stehender Spindel
G 87 Aufbohren, Rücklaufgeschwindigkeit von Hand
G 88 Aufbohren, Rücklaufgeschwindigkeit von Hand, mit Verweilzeit
G 89 Aufbohren, mit Verweilzeit.

Für die Steuerungen des Systems NC 400, gefertigt im VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt, wurden zusätzlich festgelegt:

G 06 Vorschubbeeinflussung Aus
G 26 Pendeln zwischen 2 vorgegebenen Punkten
G 27 Löschen G 28, G 29
G 28, (G 29) Schleife fahren positiv (negativ)
G 32 nicht-tangentialer Übergang
G 36 (G 37) Beginn (Ende) der Durchmesserkorrektur
G 38 (G 39) Beginn (Ende) der Lagekorrektur
G 65 Löschen G 66, G 67
G 66 Rückzug bis Endschalter bei Bohrzyklen
G 67 programmierbarer Rückzug bei Bohrzyklen
G 68 Löschen G 69
G 69 Tischumschlagbearbeitung
G 90 Interpolationsbereich XYZ
G 91 Interpolationsbereich UVW
G 92 Interpolationsbereich XYW
G 93 Interpolationsbereich XVW
G 96 Interpolationsbereich CYZ
G 97 Interpolationsbereich BYZ.

2.6.8. Vorschübe und Drehzahlen

Vorschübe und Drehzahlen können nach TGL 200-0863/06 direkt oder verschlüsselt angegeben werden. Bei direkter Programmierung erfolgt die Angabe in dezimalen Vielfachen oder Bruchteilen der gewählten Einheit

mm/min bei unabhängigem
mm/U oder mm/Hub bei abhängigem Vorschub
U/min oder Grad/min bei Spindeldrehzahlen.

Die geometrische Verschlüsselung verwendet Vorzugszahlen der geometrischen Folge R 20 (Stufensprung $\varphi = \sqrt[20]{10} \approx 1{,}12$) nach Tafel 2.7.

Multiplikation der Zahlenwerte mit 10 oder 10^{-1} ist erlaubt. [1.9] gibt für die Folge R 20 56% der Werkzeugmaschinen an.

Tafel 2.7. Zuordnung der Schlüsselzahlen R 20 zu den Zahlenwerten

Schlüsselzahl	Zahlenwert	Schlüsselzahl	Zahlenwert	Schlüsselzahl	Zahlenwert	Schlüsselzahl	Zahlenwert	Schlüsselzahl	Zahlenwert
00	0 (Halt)	20	1	40	10	60	100	80	1000
01	0,112	21	1,12	41	11,2	61	112	81	1120
02	0,125	22	1,25	42	12,5	62	125	82	1250
03	0,14	23	1,4	43	14	63	140	83	1400
04	0,16	24	1,6	44	16	64	160	84	1600
05	0,18	25	1,8	45	18	65	180	85	1800
06	0,2	26	2	46	20	66	200	86	2000
07	0,224	27	2,24	47	22,4	67	224	87	2240
08	0,25	28	2,5	48	25	68	250	88	2500
09	0,28	29	2,8	49	28	69	280	89	2800
10	0,315	30	3,15	50	31,5	70	315	90	3150
11	0,355	31	3,55	51	35,5	71	355	91	3550
12	0,4	32	4	52	40	72	400	92	4000
13	0,45	33	4,5	53	45	73	450	93	4500
14	0,5	34	5	54	50	74	500	94	5000
15	0,56	35	5,6	55	56	75	560	95	5600
16	0,63	36	6,3	56	63	76	630	96	6300
17	0,71	37	7,1	57	71	77	710	97	7100
18	0,8	38	8	58	80	78	800	98	8000
19	0,9	39	9	59	90	79	900	99	Eilgang

2.6.9. Achsen und Bewegungsrichtung

TGL 24319 (ISO R 841) definiert die Bewegungsrichtungen an Werkzeugmaschinen auf der Grundlage sich bewegender Werkzeuge bei feststehendem Werkstück (s. a. Bild 5.57).

Das *Standardkoordinatensystem* ist ein Rechtssystem, bezogen auf das Werkstück.

Die unten angegebenen Richtungen sind umzukehren (Bezeichnung x', y' ...), wenn man das Werkzeug als feststehend und das Werkstück als bewegtes Teil betrachtet (Kreuzschiebetischmaschinen).

Die z-Achse läuft parallel zur Hauptspindel, bei mehreren Spindeln ist eine zur Hauptspindel zu erklären. Wenn die Hauptspindel schwenkbar ist oder bei Maschinen ohne Spindel läuft die z-Richtung senkrecht zur Werkstückaufnahmefläche. Positive z-Richtung: Werkstückaufnahme → Werkzeughalter (Entfernen des Werkzeugs bei Bewegung in Richtung $+ z$).

Die x-Achse läuft waagerecht, senkrecht zu z, parallel zur Werkstückaufspannfläche.

Positive x-Werte liegen rechts, wenn man

- bei waagerechter z-Achse von der Spindel zum Werkstück
- bei senkrechter z-Achse von der Vorderseite zur Rückseite der Maschine blickt.

Bei Maschinen mit rotationssymmetrischer Oberfläche verläuft x (und u; p) radial, von der Rotationsachse nach außen positiv (Entfernen des Werkzeugs bei Bewegung in Richtung $+ x$).

Die y-Achse ist durch das rechtwinklige (kartesische) Koordinatensystem bestimmt.

Drehbewegung (A, B, C-Achse, weiter D bzw. E)

Eine Drehung ist positiv, wenn sie in Blickrichtung steigender Koordinatenwerte im Uhrzeigersinn erfolgt.

Drehrichtung der Spindel im Uhrzeigersinn bei Blickrichtung von der Spindel zum Werkstück.

3. WEG- UND WINKELMESSUNG

3.1. Allgemeines

Von allen meßtechnischen Aufgaben im Fertigungsprozeß sind 85 bis 90% Längenmessungen [3.1]. Aus diesem Anteil wird die Bedeutung der NC klar, deren wesentliches Merkmal die ständige Längenmessung ist. Mit der Wahl des Meßverfahrens wird auch die günstige innere Datenverarbeitung bestimmt; denn alle zusätzlichen Umsetzer stellen vermeidbaren Mehraufwand dar.

Das 1890 von Prof. *Abbe* aufgestellte Prinzip fehlerfreier Längenvergleiche besagt, daß nur dann Führungsfehler ausgeschlossen sind, wenn Meß- und Vergleichsstrecke deckungsgleich oder wenigstens fluchtend hintereinanderliegen (Mikrometerschraube).

Bei der unmittelbaren Messung am Werkstück, z. B. bei Meßsteuerungen an Rundteilen mit Meßbacken, werden Störgrößen weitgehend kompensiert. Zugänglichkeit, Behinderung und Umgebungsbedingungen schließen die unmittelbare Messung jedoch meist aus.

Dagegen bedienen wir uns mittelbarer Maßverkörperungen, die an den bewegten Maschinenelementen an solchen Stellen anzuordnen sind, daß Kippfehler möglichst vermieden werden (nahe der Bearbeitungs- und der Kraftangriffsebene). Maßverkörperungen der Längenprüftechnik (TGL 15040) sind Meßmittel, die Längeneinheiten bzw. deren Vielfache oder Teile verkörpern (Abbilder eines Maßnormals).

Durch spezielle Linse-Spiegel-Systeme [3.2] oder unter Nutzung der Eigenschaft von Knotenpunktstrahlen – diese schließen mit der Systemachse vor und hinter Konvexlinsen den gleichen Winkel ein – kann Unempfindlichkeit gegen Kippen erreicht werden (Eppsteinprinzip).

Eine weitere Unterscheidung der mittelbaren Messung nach geometrischen Gesichtspunkten ist die

- direkte Maßverkörperung (z. B. Linearmaßstab)
- indirekte Maßverkörperung mit Hilfe eines mechanischen Wandlers (z. B. Wälzschraubtrieb, Bild 3.1).

Letztere sind meist leicht anzubauen, weisen aber den Nachteil zusätzlicher statischer und dynamischer Fehler im Wandler auf – als Lose, toter Gang, Umkehrspiel bekannt –, wodurch die erreichbare Genauigkeit der Gesamtmaschine bei 10 bis 20 μm liegt (Meßlänge < 1 m). Trotzdem kann die Repetierbarkeit (Reproduzierbarkeit), als statistische Größe aus einer Vielzahl von Meßwerten gemittelt, wesentlich besser sein. Oft ist sie bedeutender als die absolute Genauigkeit, da sie die Gleichmäßigkeit des technologischen Prozesses kennzeichnet und durch Korrekturen die absoluten Maße angenähert werden können.

Innerhalb des RGW sind die Genauigkeiten gemäß Tafel 3.1 festgelegt.

Ein weiteres Einteilungsmerkmal ist die Art der Meßwerterfassung,
- analog (z. B. Widerstandsabtastung) gemäß Bild 3.2
- diskret–digital (z. B. Impulsgeber).

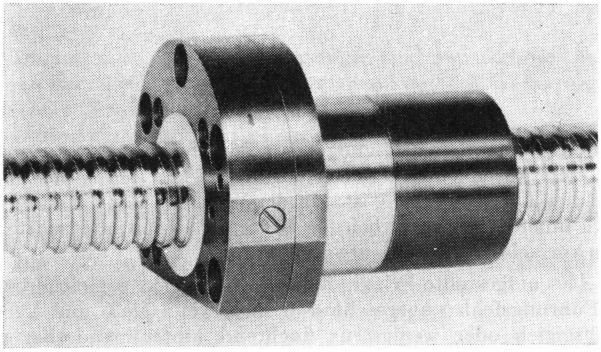


Bild 3.1. Wälzschraubtrieb
Werkfoto VEB Carl Zeiss JENA

Tafel 3.1. Genauigkeitsklassen

Größe der Koordinaten-verschiebung	Genauigkeit der automatischen Positionierung, maximale Abweichung					Genauigkeit der Rückführeinrichtung (Bewegungsintervall = n · Auflösungsintervall) maximale Abweichung				
mm	µm					µm				
	Klasse									
	(N)I	(P)II	(V)III	(A)IV	(S)V	(N)I	(P)II	(V)III	(A)IV	(S)V
125	25	13	6	3	1,5	8	4	2	1	1
> 125 ··· 200	32	16	8	4	2	10	5	3	1,5	1
> 200 ··· 320	40	20	10	5	2,5	12	6	3,5	2	1
> 320 ··· 500	50	25	12	6	3	15	8	4	2,5	1,5
> 500 ··· 800	63	32	16	8	4	19	10	6	3	2
> 800 ··· 1250	80	40	20	10	5	24	12	7	3,5	2,5
> 1250 ··· 2000	100	50	25	12	6	30	15	9	4	3
> 2000 ··· 3200	125	63	32	16	8	37	19	11	6	4
	mit dem Auflösungsvermögen in µm									
	10	5	2	1	0,5					

Allen digitalen Verfahren haftet der Digitalisierungsfehler von $\pm$ 1 Abtasteinheit an.

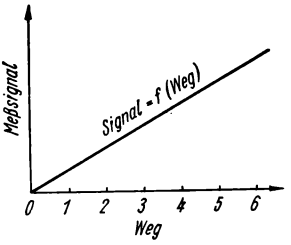


Bild 3.2. Analoge Messung

Fester oder variabler Bezug unterscheiden in

- absolute Messung der Lage (z.B. Codegeber) nach Bild 3.3
- relative Messung von Weg bzw. Winkel (inkrementale Impulsgeber) nach Bild 3.4.

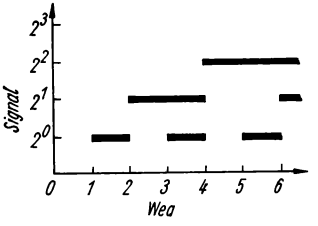


Bild 3.3. Digital-absolute Messung

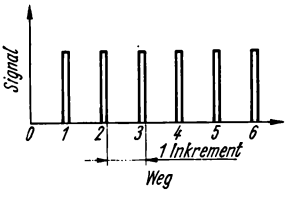


Bild 3.4. Inkrementale Messung

Die bei relativer Messung zu verarbeitende Frequenz $>$ 100 kHz wird mit den Logiksystemen beherrscht; gegen Störimpulse ist entsprechend zu schützen, Aufwand s. [3.3].

Periodisch aufgebaute Verfahren können hybriden Charakter erhalten, d.h., innerhalb der Periode wird analog gearbeitet, die Perioden selbst werden inkremental erfaßt (z.B. Inductosyn).

Schließlich unterscheidet man hinsichtlich der physikalischen Effekte

- mechanisch (Schleifer auf Codescheiben bzw. Widerständen):
  Novotechnik, BRD
- fotoelektrisch (Auflichtverfahren, Durchlichtverfahren, codierte Scheiben, Strichgitter):
  WMS, IGR, VEB Carl Zeiss JENA
- elektromagnetisch (Spannungsinduzierung; Hallgenerator):
  Resolver, ДЛИМ UdSSR; Inductosyn, USA; Grundig-Geber, BRD
- kapazitiv (Änderung der Dielektrizität):
  Geber der SEA, Frankreich
- mittels Interferenz (Laser):
  Laserinterferometer.

Verschleißfreie, berührungslose Abtastprinzipien werden bevorzugt, mechanische Verfahren dagegen nur für langsame Bewegungen in kleinen Wegen angewendet.

Weg- und Winkelgeber sind AD-Wandler (digitale Geber) oder AA-Wandler (analoge Geber), in denen die analogen Eingangsgrößen Weg bzw. Winkel in elektrische Signale umgesetzt werden. Das sei das Unterscheidungsmerkmal der Abschnitte 3.2. und 3.3., wobei Überschneidungen nicht ausgeschlossen sind.

Bei genauer Betrachtung tritt bei digitalen Gebern eine doppelte Wandlung ein:

analog (Weg) → analog (quasi sinusförmige Spannung)
→ digital (getriggertes, gequanteltes Signal).

Vergleich der Prinzipien

Der Verfasser ist sich bewußt, daß nachfolgender Vergleich der Geber mit der Istwerterfassung nicht exakt sein kann, da die physikalischen Prinzipien zu überlagern wären und die Arten miteinander korrespondieren.

Begriff	Vorteile	Nachteile
1 Unmittelbare Messung	Messung am Objekt selbst hochgenau	Behinderung im Prozeß, Messung nicht berührungslos
2 Mittelbare Messung	leichtere Anbringung an der Maschine gegenüber 1	Kippfehler, Maßverkörperungen ergeben Fehler
3 Direkt	keine mechanischen Zwischenglieder, genauer als 4	Aufwand höher als 4, Abdeckung bei optischen Gebern schwierig, weniger Lichtausbeute beim Auflichtverfahren
4 Indirekt	einfacher als 3, Wandler = Antriebselement, Vergrößerungseffekt durch Getriebe möglich	mechanischer Wandler zwischengeschaltet, ungenauer als 3
5 Analoge Geber (phasenzyklisch)	einfach im Aufbau (besonders bei rotatorischen Gebern), einfache Technologie bei translatorischen Gebern (gedruckte Schaltung), einfache Nullpunktverschiebung, unempfindlich gegen Öl und Kühlflüssigkeit	Abhängigkeit der Elektrik von physikalischen Parametern (Temperatur, Alterung), Speisefrequenz > 50 Hz, exponentiell ansteigender Aufwand mit steigender Genauigkeit, DA-Wandler nötig, Istwertanzeige schwierig, Auflösung begrenzt
6 Digitale Geber	Auflösung hoch, Fehler $\pm$ 1 Digit, unabhängig von physikalischen Parametern (außer mechanischen!)	Codierung aufwendig, komplizierter als 5
7 Absolute Geber	reproduzierbare Lagemessung, keine Fehlerverschleppung, BCD-Ausgang möglich	aufwendiger als 8, besonders für translatorische, digitale Messung; hohe Auflösung bei translatorischer digitaler Messung bedingt Interpolation; V-Abtastung nötig
8 Inkrementale Geber	einfacher als 7, leichte Weiterverarbeitung, leichter Nullpunktabgleich	aufwendige Störungsunterdrückung, Verschleppen von Fehlern, nur Weginkrementmessung.

3.2. Digitale Meßverfahren

3.2.1. Inkrementale Geber

Unabhängig vom Typ liefern inkrementale Geber Informationen über

- die Anzahl der erfaßten Weg- oder Winkelinkremente (Δs bzw. $\Delta \alpha$). Ein Inkrement ist der Zuwachs einer Größe in gleichbleibenden Quanten.
- die Bewegungsrichtung (Geber ohne diese Bedingung sind für NC nicht geeignet).

Das geschieht einheitlich mit zwei um 90°el versetzten Impulsfolgen, y_1 und y_2 im Bild 3.5, und (meist) zur Informationssicherung auch durch deren Negation ($\bar{y}_1$, $\bar{y}_2$).

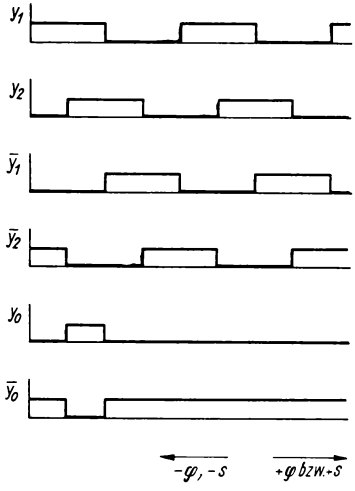


Bild 3.5. Impulsfolgen bei v, ω = konst.

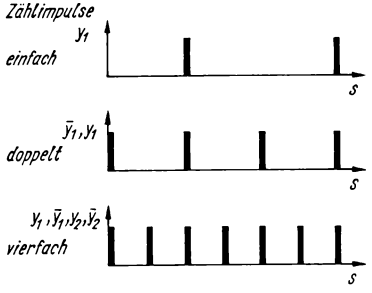


Bild 3.6. Impulsvervielfachung

Der in Phase mit der Flanke eines Zählimpulses elektronisch synchronisierte Nullimpuls y_0 ist eine Kontrollinformation je einer größeren Anzahl von Inkrementen (z.B. je 1 Umdrehung bzw. 10 mm). Durch die endliche Breite der Gitterteilung sind der Auflösung Grenzen gesetzt (Strichgitter auf Glas mit $\geqq 4$ µm Teilung).

Die Anzahl der Impulse je Periode (Hell-Dunkel-Feld) läßt sich elektronisch verdoppeln bzw. vervierfachen (Bild 3.6). Mit Sonderschaltungen (Analogunterteilung) kann man aus den etwa sinusförmigen Spannungen durch Überlagerung weitere Spannungsverläufe erzeugen (Heidenhain) und erreicht bis 16fache Unterteilung. Der nachgeschaltete Trigger erhält eine so große Hysterese, daß am Schaltpunkt keine Fehlimpulse entstehen können.

Die Bewegungsrichtung wird aus der Verschiebung von y_2 gegenüber y_1 ermittelt (s. Bild 5.31).

Die meisten Inkrementalgeber arbeiten fotoelektrisch (Bild 3.7). Die einem Si-Sperrschichtfotoelement bzw. Si-Fototransistor zugeführte Beleuchtungs-

stärke wird in ihm (innerer Fotoeffekt) in eine Spannung umgesetzt. Durch das Abtastgitter wird der Fotostrom bei Abtastung mehrerer (5 im Bild 3.7) Felder vervielfacht und die 90°-Verschiebung erreicht. Schaltet man zwei lichtempfindliche Elemente antiparallel, entsteht eine symmetrische (annähernd sinusförmige) Spannung doppelter Amplitude bei konstanter Geschwindigkeit des Gitterträgers [3.4].

$$\begin{aligned} U_1 &= K + a \sin \alpha \\ U_2 &= K + a \sin (\alpha + \pi) \\ \Delta U &= U_1 - U_2 = 2\, a \sin \alpha. \end{aligned} \tag{3.1}$$

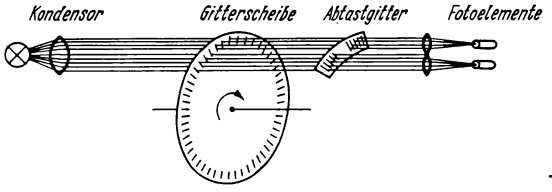


Bild 3.7. Rotatorischer Geber

Gl. (3.1) wird mit einem IC-Differenzkomparator in Gegentaktschaltung verwirklicht, wobei gleichzeitig Gleichspannungsanteile und Störungen unterdrückt werden (Bild 3.8) und das analoge Signal in eine Pulsfolge (Impulsformerstufe) umgesetzt wird.

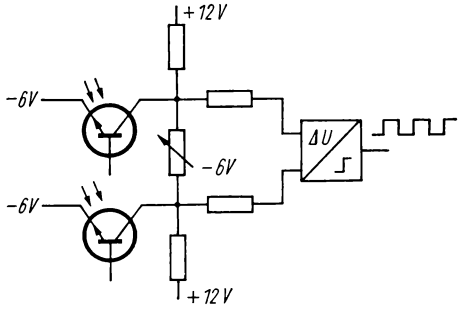


Bild 3.8. Impulsformerstufe

Das Tastverhältnis (Bild 3.9), d.h. bei konstanter Bewegungsgeschwindigkeit das Verhältnis $t_p : t_0$, beträgt $1:1 \pm 20\%$. Die Angabe $t_p : \tau = (1:2) \pm 10\%$ ist auch üblich.

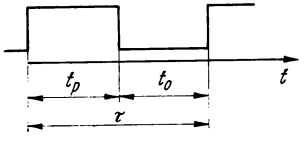


Bild 3.9. Tastverhältnis

Innerhalb des Gebers sind die energiearmen Kanäle (etwa 20 μA Fotostrom/1000 lx) zwischen Fotoelement, Verstärker und Trigger gegen äußere Störungen zu schirmen und die Geräte HF-dicht zu gestalten (Bild 3.10).

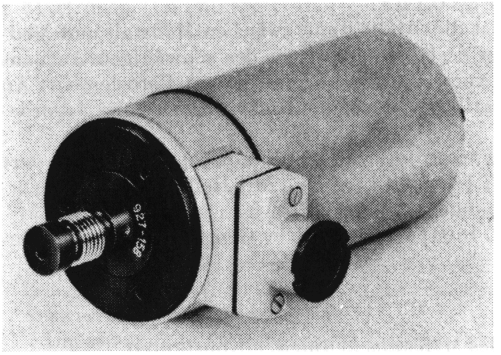


Bild 3.10
Inkrementalgeber IGR
Werkfoto VEB Carl Zeiss JENA

Die Gitterteilung wird auf den Träger durch Kopieren vom Original aufgebracht. Die Forderung nach höherer Genauigkeit des Originals regt zu immer neuen Verfahren an, z. B. Verwendung von Hologrammen eines Lasers (Heidenhain). Mit Hilfe des Abtastgitters (Bild 3.11), mit dem auch die 90°-Phasenverschiebung entsteht, wird beim Durchlichtverfahren der Lichtstrom auf die Abtastzone begrenzt und Streulicht ausgeschlossen. Da das Maximum der spektralen Empfindlichkeit bei Si-Fotoelementen bei der Wellenlänge 0,85 μm (sichtbare Wellenlänge $\approx 0{,}4 \cdots 0{,}76$ μm) liegt [3.5] [3.6], müssen die Dunkelfelder hochgradig infrarot undurchlässig sein bzw. muß der Infrarotanteil der Lichtquelle durch Glasfaser-Lichtleiter beschränkt werden.

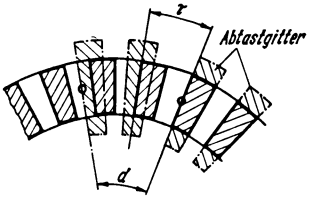


Bild 3.11. Abtastung
d Abstand der lichtempfindlichen Elemente bzw. Gegengitter

$$d = n\frac{\tau}{2} \pm \frac{\tau}{4}$$

Si-Fotoelemente sind bis 100 °C arbeitsfähig (Temperaturkoeffizient — 2 mV/K), man erreicht eine Leerlaufspannung von 0,5 V, $\eta = 0{,}11$, und einen Kurzschlußstromanstieg bis 80% vom Endwert in 10 μs [3.7]. Nutzt man nur $\geqq 30\%$ des Kurzschlußstroms, sind Lichtfrequenzen über 100 kHz zulässig.

Fotodioden lassen den Sperrstrom bei Beleuchtung ansteigen, weisen ein sehr hohes Verhältnis Hell- zu Dunkelstrom auf und haben eine Zeitkonstante in der Größenordnung von Mikrosekunden [3.7].

Bei Fototransistoren wird der kollektorseitige pn- bzw. np-Übergang beleuchtet. Sie weisen gegenüber Fotodioden einen zusätzlichen Verstärkungseffekt auf, der

mit der Beleuchtungsstärke zunimmt (nichtlineare Elemente). Die hohe Empfindlichkeit von 1 A/lm (1 lx $\triangleq$ 1 lm/m²) ist bemerkenswert, jedoch sind Fototransistoren träger als Fotodioden ($f_{max} \approx 100$ kHz). Kollektorspannungen und -ströme sowie Verlustleistung entsprechen denen vergleichbarer Transistoren [3.7], der Dunkelstrom ist kleiner als 0,1 μA.

Bei translatorischen Geräten ist die Abdichtung zwischen Maßstab und Meßkopf problematisch. Sie arbeiten deshalb und wegen des schwierigen Aufbaus meist im Auflichtverfahren mit verminderter Lichtstärke am Fotoelement. An die Anbautoleranzen und die Statik des Maschinentischs werden hohe Anforderungen gestellt.

Die starke Abhängigkeit des Fotostroms von der Lampenspannung erfordert deren Stabilisierung (s. Abschn. 7.1.) auf $\Delta U \leqq 5\%$. Mit Helligkeitsregelung erfaßt man auch Alterungserscheinungen.

Die Maßstäbe sind nach TGL 15041/01 und /02 in Genauigkeitsklassen eingeteilt.

$$f_l = a + b\,l;$$

f_l Teilungsfehler in μm, l Länge des Maßstabs in μm, a, b Konstanten.

Klasse 7 B $f_l = \pm\,(2 + 5 \cdot 10^{-6}\,l)$ μm; Teilungssprung 4 μm

Klasse 8 A $f_l = \pm\,(5 + 5 \cdot 10^{-6}\,l)$ μm; Teilungssprung 10 μm

Klasse 9 A $f_l = \pm\,(10 + 10 \cdot 10^{-6}\,l)$ μm; Teilungssprung 10 μm.

Ein fotoelektrischer Geber mit dynamischer Abtastung, bei dem auch im Stillstand ein Wechselspannungssignal abgegeben wird, ist der Typ PE 2432 von Philips. Die Position wird aus der Phasenverschiebung von zwei Wechselspannungen abgeleitet, die durch unterschiedliche Frequenzen im Bewegungsvorgang erzeugt wird. Dieser Geber besticht durch seine unkritischen Einbauvorschriften.

Der Antrieb rotatorischer Geber erfolgt über nichtselbsthemmende Wälzschraubtriebe (Bild 3.1), die meist gleichzeitig zur Kraftübertragung dienen, oder mit Zahnstange – Ritzel. Die Genauigkeit liegt in der Steigung, dem Spiel und der durch Reibung bedingten Erwärmung. Ein guter Wälzschraubtrieb zeichnet sich durch einen hohen Wirkungsgrad ($> 90\%$), Vermeiden des bei sehr kleinen Ralativbewegungen möglichen Stick-slip-Effekts (Wechsel zwischen Gleit- und Haftreibung) und Vorspannung mit zwei gegeneinander verspannten Kugelumlaufmuttern [3.8] aus, wodurch man eine große axiale Steife erreicht.

Wälzschraubtriebe des VEB Carl Zeiss JENA werden mit unterschiedlichen Tragzahlen (Belastung), die sich im Durchmesser der Spindel ausdrücken, und verschiedenen Steigungen (5, 10 oder 20 mm) geliefert. Näheres s. [3.8].

Bei induktiver Abtastung wird nach dem Faradayschen Gesetz

$$e = -\,w\,\frac{\mathrm{d}\,\Phi}{\mathrm{d}\,t}$$

$$e \sim v.$$

Diese unerlaubte Abhängigkeit der Signalamplitude von der Bewegungsgeschwindigkeit wird durch

– Abtastung mit Hallgeneratoren oder

– Verwendung einer Trägerfrequenz

vermieden.

Hallgeneratoren sind Halbleiterbauelemente aus InSb bzw. InAs, eingebettet in einen Ferritkreis [3.9] [3.10]. Werden die etwa 5 μm dicken Halbleiterplättchen, die von einem Steuerstrom i_{St} (etwa 50 mA) durchflossen werden, in ein senkrecht zu ihrer Ebene stehendes Magnetfeld gebracht, entsteht durch Ablenkung der Elektronen (Lorentzkraft) die Hallspannung zwischen den Rändern des Plättchens ($U_H = 20$ bis 100 mV bei $R_i \approx 10\ \Omega$). Das Magnetfeld wird von der mit der Rasterteilung τ auf eine Metallscheibe oder einen Metallstreifen aufgebrachten Magnetisierung erzeugt, seine relative Lage x zum Hallgenerator induziert die Spannung

$$U_H = C\, i_{St}\, \Phi \sin \frac{2\pi x}{\tau}. \tag{3.2}$$

(Φ abhängig von der magnetischen Feldstärke, von der Streifenbreite, vom Luftspalt).

Da U_H keinen Zeitparameter enthält, ist die Hallspannung unabhängig von der Bewegungsgeschwindigkeit. Die Digitalisierung erfolgt mit Verstärkern unter Auswertung der Nulldurchgänge.

Die erreichbare Frequenz beträgt einige 100 kHz, die Anzahl der Impulse/Umdrehung liegt zwischen 1500 und 4000 (Ausführungsbeispiel ist der Geber von Siemens).

Systeme mit Trägerfrequenz nutzen die Modulation (Näheres s. z. B. *Philippow* [3.11], *Woschni* [3.12]), d. h. die Veränderung der hochfrequenten Trägerschwingung

$u_T = A_T \cos(\omega_T t + \varphi)$ durch ein niederfrequentes Signal

$u_S = A_S \cos \omega_S t$.

Die Amplitudenmodulation variiert A (Bild 3.12)

$$u_{AM} = (A_T + A_S \cos \omega_S t) \cos \omega_T t, \tag{3.3}$$

die Phasenmodulation φ

$$u_{PM} = A_T \cos(\omega_T t + \underbrace{A_S \cos \omega_S t}_{\varphi(t)}); \tag{3.4}$$

A_S hier Phasenhub.

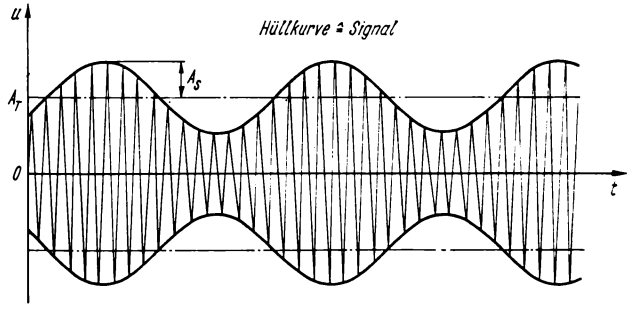


Bild 3.12. Amplitudenmodulation

Mit $$\Delta\omega(t) = \frac{\mathrm{d}\varphi(t)}{\mathrm{d}t} = -A_S\omega_S \sin\omega_S t \tag{3.5}$$

geht Gl. (3.4) in die Frequenzmodulation über:

$$u_{FM} = A_T \cos(\omega_T - A_S\omega_S \sin\omega_S t)\,t. \tag{3.6}$$

Bei den Gebern mit Amplitudenmodulation wird das Signal dagegen nicht zeit-, sondern wegabhängig durch Variation des magnetischen Widerstands von Differentialspulen bzw. -transformatoren (Bild 3.13) oder durch unterschiedliche

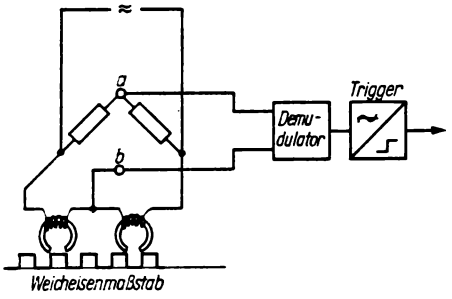


Bild 3.13. Differentialspule

Flußverkettung eines Spulenpaars (Bild 3.14) aufgeprägt. Bei der letztgenannten Anordnung tritt wie beim Resolver (s. Abschn. 3.3.1.), hier liegt an sich ein analoger Geber vor, beim Nulldurchgang ein Phasensprung auf (Bild 3.15). Die Trägerfrequenz liegt mindestens bei 100 kHz, um genügend großen Abstand zur Abtastfrequenz zu erhalten [1.1].

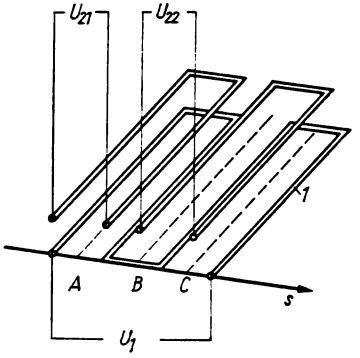


Bild 3.14. Leiterschleifenanordnung (Firma Grundig)

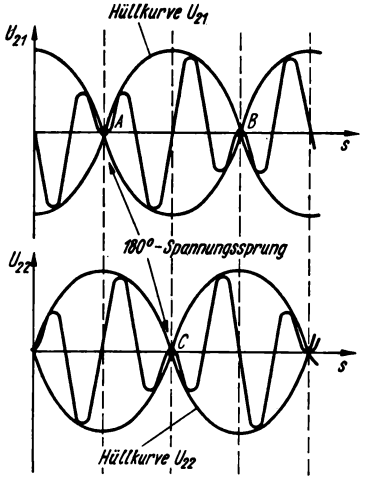


Bild 3.15. Spannungsverlauf der Anordnung Bild 3.14

Der induktive Lineargeber ДЛМ – 11 [3.13] interpoliert zwischen der Skalenteilung durch Phasenverschiebung der Meßspannung gegenüber der 500-Hz-Bezugsspannung; seine Schrittweite beträgt 1 oder 2 mm.

Bei kapazitiven Gebern wird die proportionale Änderung der Kapazität mit der wirksamen Plattengröße ausgenutzt, $C \sim \varepsilon \frac{A}{d}$, die durch relative Verschiebung der Zähne eintritt. Die physikalisch bedingte Grenze mechanischer Maßverkörperungen wird durch die Wellenlänge als Meßbasis überwunden, weshalb heute die Längeneinheit „Meter" in Wellenlängeneinheiten definiert ist.

Mit dem Laserinterferometer (Bild 3.16, Wickelson-I.) steht seit einem Jahrzehnt ein inkrementales System höchster Auflösung zur Verfügung, das wegen seines Aufwands und der nötigen Steife der Werkzeugmaschine einschließlich Isolierung des Fundaments bisher nur für Laboruntersuchungen eingesetzt wurde (Eichen von Meßsystemen, Abnahme von NCM und Meßmaschinen). Ausgeführt werden He-Ne-Gaslaser [3.14] [3.15], die frequenzstabilisiertes (10^{-7}), kohärentes einwelliges rotes Licht der Wellenlänge 0,6328 µm unter Normalbedingungen (21 °C; 0,964 bar) ausstrahlen.

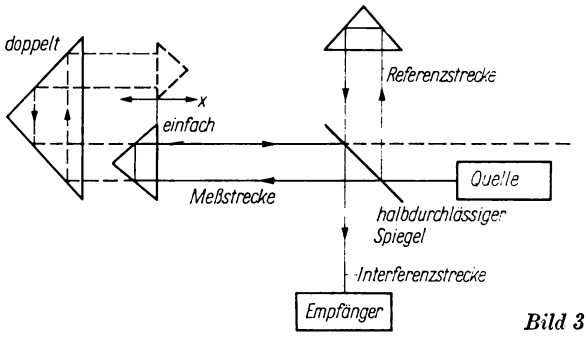


Bild 3.16. Laserinterferometer

Die Kohärenz des Laserlichts gestattet auch bei größeren Strecken durch Überlagerung (Kollimation) der gesendeten und der reflektierten Welle die Erzeugung stehender Wellen. Abhängig von der Meßstrecke wird die Phasenlage des Meßstrahls gegenüber der des Referenzstrahls verschoben. Werden beide zur Interferenz gebracht, entsteht ein der Meßstrecke proportionales, analoges Signal (Phasengleichheit verstärkt, Gegenphasigkeit löscht aus), das in eine Impulsfolge umgesetzt wird. Zur Richtungserkennung werden durch Ausblendung des aufgespaltenen Strahls zwei um 90° phasenverschobene Signalfolgen erzeugt.

Da die Wellenlänge der Laserstrahlen von der Lufttemperatur, dem Luftdruck und der Luftfeuchte über den Brechungsindex Luft gegenüber Vakuum abhängt, sind diese Größen gleichzeitig mit der Umrechnung bzw. Wandlung (Iterationsverfahren s. [3.16]) der Inkremente, bezogen auf $\lambda_{\text{Laser}} = 0{,}6328$ µm, in dezimale Werte zu berücksichtigen. 0,1 µm ist die erreichbare Auflösung bei 10 m Meßlänge (Fehler $\approx 10^{-2}$ µm/m) [3.17] [3.18].

Die Wellenlänge des Signals beträgt bei einfacher Meßlänge nach Bild 3.16 $\lambda/2$, bei doppelter Meßlänge $\lambda/4$. Mit IC-Schaltungen sind Vorschubgeschwindigkeiten ($f \sim v$) bis 3 m/min zu erfassen.

3.2.2. Digital-absolute Geber

Wege oder Winkel werden durch einen Zahlencode auf digitale, eindeutige Signale abgebildet. Im Abschn. 2.4.1. wird nachgewiesen, daß einschrittige Codes keiner Sondermaßnahmen zur Abtastung bedürfen. Da alle Spuren so eng wie die feinste zu tolerieren sind, treten bei mehreren, über Getriebe verbundenen Codescheiben erhebliche Schwierigkeiten auf. Die nicht einschrittige Dual- bzw. BCD-Codierung vermeidet diesen Nachteil, benötigt jedoch Doppelabtastung (V- bzw. U-Abtastung, Klieverlogik [3.19]).

Der Dualcode weist folgende Gesetzmäßigkeit an den Übergangsstellen der Dualzahlen (Ableselinie) für sichere Ablesung auf (Bild 3.17 für das Beispiel „5"):

Stelle $S_{i-1} \triangleq 0 \Rightarrow F_{iv}$ voreilend in Richtung höherer Dualzahlen,

$S_{i-1} \triangleq \mathrm{L} \Rightarrow F_{in}$ nacheilend.

$$S_i = S_{i-1} F_{iv} \vee S_{i-1} F_{in}. \tag{3.7}$$

Gl. (3.7) wird gemäß Bild 3.18 realisiert.

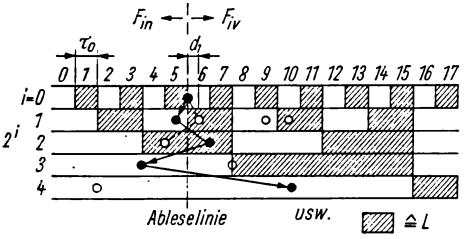


Bild 3.17. V-Abtastung „5", dual /// = *L*
gelesene Fotoelemente F_i ●
nicht gelesene Fotoelemente F_i ○

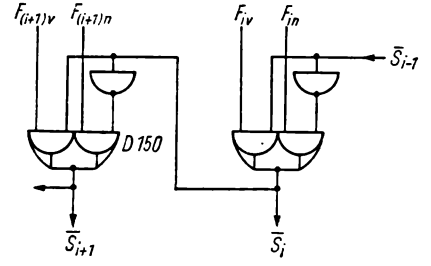


Bild 3.18. V-Abtastung

Maximale Sicherheit wird erreicht, wenn die Fototransistoren in der Mitte des Toleranzbereichs, d.h. im Abstand $d_i = \frac{\tau_{i-1}}{2} = \frac{\tau_i}{4}$ (bzw. um $2\,\tau_i$ versetzt), angeordnet werden. Bei höheren Spuren kann d_i kleiner gehalten werden, weil der Toleranzbereich nicht erforderlich ist.

Spur 2° bestimmt somit Auflösung, Genauigkeit, Relativgeschwindigkeit und ist maßgeblich für die Schaltzeiten, Schwingungen, Flankenform der Signale u.ä. Zur Fotoelektronik s. Abschn. 3.2.1.

Gemäß Bild 3.18 durchläuft das Signal je Spur zwei Gatter und wird $t_v \leqq 2 \cdot 22 = 44$ ns verzögert. Die Abfrage ist daher $n \cdot 44$ ns lang zu sperren ($\geqq 1$ µs).

Die Grenzfrequenz bei Fototransistoren von etwa 100 kHz wird im Eilgang überschritten (10 µs/bit entsprechen bei 10 µm Auflösung 3,6 m/min). Man muß daher auf die Auswertung der niedrigsten Spuren verzichten, aber deren Information zwischenspeichern bis zu der Spur, die sich während des Abfragezyklus nur maximal einmal ändern kann.

Bei rotatorischen dualcodierten Gebern muß der Vollkreis in 2^k Segmente zerlegt werden, da nur so ein eindeutiger Übergang von $360° \leftrightarrow 0°$ und das Zusammenspiel mehrerer Scheiben im Geber erreicht werden (z.B. $2^{10} = 1024$ Teilungen). Die Wandler Zahnstange und Wälzschraubtrieb müssen eine angepaßte Steigung (z.B. 10,24 mm) erhalten, was ihre Herstellung erschwert.

Die Gebertypen unterscheiden sich in der Spurenzahl m und der Ausführung mit oder ohne eingebaute V-Logik. Bei letzteren sind $2m - 1$ Signale bis zur Auswerteschaltung zu übertragen.

Bei BCD-Codierung ist die Einheitlichkeit gestört. Das Fototransistorpaar in Spur 2^3 (wegen des Abbruchs bei „9") muß aus 2° abgeleitet werden, sein Ergebnis ist für die Spur 2° der nächsten Tetrade ausschlaggebend (Bild 3.19):

$$S_0 \triangleq 0 \Longrightarrow F_{1v}, F_{3v};\ S_1 \triangleq 0 \Longrightarrow F_{2v}$$

$$S_0 \triangleq \mathrm{L} \Longrightarrow F_{1n}, F_{3n};\ S_1 \triangleq \mathrm{L} \Longrightarrow F_{2n}$$

$$\left.\begin{array}{l} S_3 \triangleq 0 \Longrightarrow F_{0v} \\ S_3 \triangleq \mathrm{L} \Longrightarrow F_{0n}. \end{array}\right\} \text{ der nächsten Tetrade}$$

Die Anordnung $\tau_i/4$ von der Ableselinie (wie bei Dualcodierung) erfordert kombinierte V-U-Abtastung [3.20]. Die U-Abtastung bedingt den Abstand $\tau_0/2$ für alle Abtaster einer Tetrade (oder aller dualcodierten) und somit enge Fertigungstoleranz, läßt aber alle vor- oder alle nacheilend lesen.

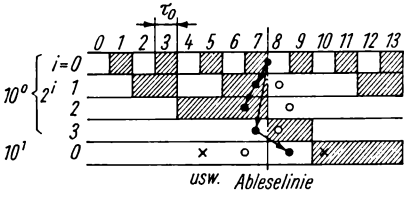


Bild 3.19. V-Abtastung „7", BCD $\boxed{\mathrm{VII}} = L$
gelesene Fotoelemente F_i ●
nicht gelesene Fotoelemente F_i O

Die geringe Verschiebung $2^3 \cdot 10^{k-1}$ ist der Ausgangspunkt für $2^0 \cdot 10^k$. Leitet man aus $5 \cdot 10^{n-1}$ oder einfacher $2^2 \wedge 2^3$ [3.21] von 10^{n-1} für $2^0 \cdot 10^n$ ab, kann der Versatz in dieser Spur wesentlich erhöht werden (× im Bild 3.19).

Bei Winkelcodierern mit Hallgeneratorabtastung [3.22] im BCD-Code garantieren fehlende Speicher Unempfindlichkeit.

Die rein absolute Arbeitsweise wird immer mehr von zyklischer Verarbeitung je 1 Umdrehung verdrängt. Translatorisch arbeitende absolute fotoelektrische Geber haben sich wegen des erheblichen Aufwands nicht eingeführt.

In der DDR stehen folgende fotoelektrische Geber zur Verfügung:

- WMS 2^{17} p mit 33 parallelen Ausgängen
- WMS 10^6 pv und spv mit V-Abtastung, 23 parallelen bzw. 4 serienparallelen Ausgängen (Bild 3.20).

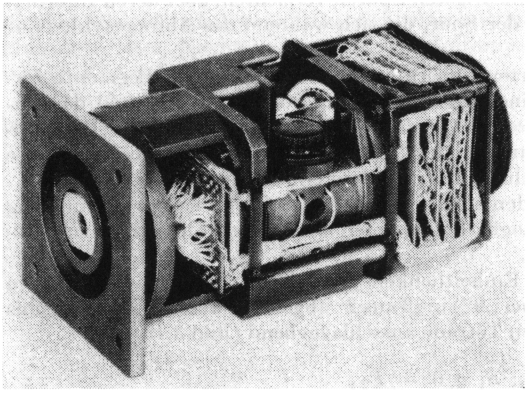


Bild 3.20. WMS 10^6
Werkfoto VEB Carl Zeiss JENA

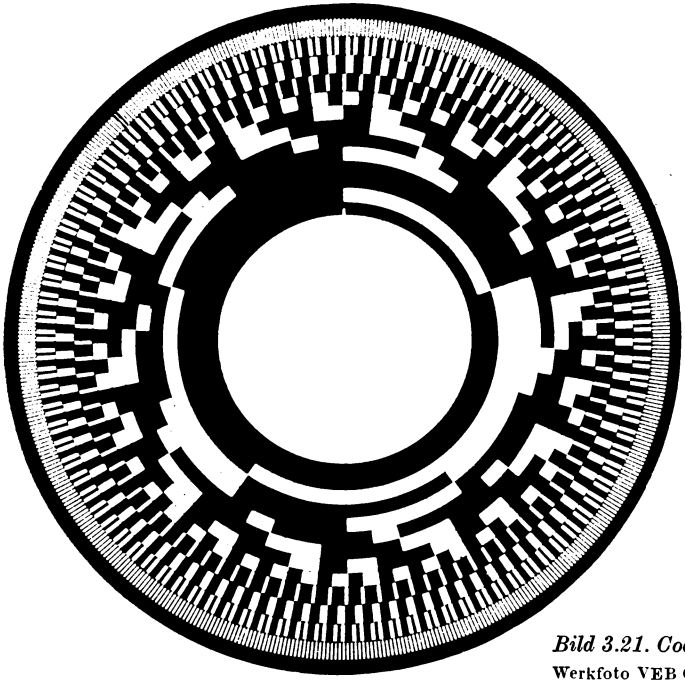


Bild 3.21. Codescheibe,
Werkfoto VEB Carl Zeiss JENA

Bei der BCD-Ausführung werden drei codierte Glasscheiben (Bild 3.21) untersetzt angetrieben (10^0 bis 10^2; 10^3; 10^4 und 10^5).

Die Geschwindigkeit wird mechanisch auf 3600 U/min, elektrisch durch die Taktfrequenz begrenzt. Zwischen der ausschlaggebenden Ablesung 10^0 und 10^1 vergehen nach Abschn. 5.7.1. 40 µs. Während dieser Zeit darf sich die Scheibe weniger als τ_0 verdreht haben. Das entspricht dem theoretischen Grenzwert von 10 µm/40 µs = 15 m/min.

3.3. Analoge Meßverfahren

Analoge Verfahren arbeiten berührungslos mit induktiv induzierter Spannung, kapazitiv oder im Ausnahmefall elektromechanisch durch Präzisionswiderstände mit Schleifkontakten. Die physikalischen Prinzipien der Erfassung unterscheiden sich daher nicht von denen gleichartiger digitaler Geräte, lediglich die Ansprechempfindlichkeit des analogen Vergleichs tritt an die Stelle des Digitalisierungsfehlers. Wird das Analogsignal digitalisiert, verschmelzen digitale und analoge Meßtechnik.

3.3.1. Drehmelder

Drehmelder bestehen für die Anwendung in NC aus gleichmäßig genutetem, lamelliertem Ständer und Läufer, wobei die Ständerwicklung 3- oder 2phasig (Ausnahmen auch 5- und 10phasig) und die Läuferwicklungen 1-, 2- oder 3phasig ausgebildet sind. Zur besseren Ausnutzung der Eisenkreise und zur Oberwellenbeschränkung werden sie mit 400 bis 500 Hz betrieben.

$$e \sim \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} \sim \omega .$$

Das klassische Einsatzgebiet von Drehmeldern (Bild 3.22) ist die elektrische Welle (Synchro mit 3 um 120° versetzten Wicklungssträngen), während zur Winkelmessung die abgegebene Spannung interessiert.

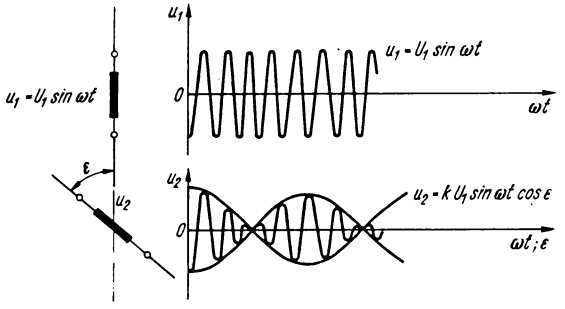


Bild 3.22. Drehmelder

Die Wirkungsweise, dargestellt an der praktisch nicht realisierten Einphasenanordnung, ist folgende [1.1]:
Die Eingangsspannung $u_1 = U_1 \sin \omega t$
induziert auf Grund der Flußverkettung, Kopplungsfaktor $k\,(\varepsilon) = k \cos \varepsilon$,

$$u_2 = k U_1 \sin \omega t \cos \varepsilon . \tag{3.8}$$

Es tritt eine Amplitudenmodulation ein (möglich ist auch die Auswertung der Phasenlage, die jedoch bezüglich vorhandener Impedanzen schwieriger ist [3.23]), und an den Knotenpunkten entsteht ein Phasensprung durch Vorzeichenwechsel von cos ε. In der NC wird vorrangig die Ausführung 1phasiger Läufer- und 2phasiger Ständerwicklung verwendet (Bild 3.23), im englischen Sprachgebrauch Resolver (Vektorzerleger) genannt [1.1] [3.23] [3.24].

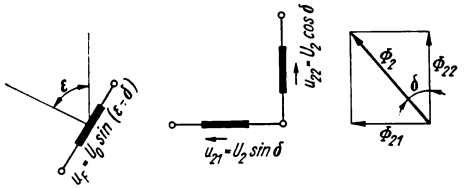


Bild 3.23. Resolver

Durch Variation des Zweiphasensystems (Winkel δ der Flußrichtung) lassen sich Sollwerte als Fehlerspannung U_F vorgeben, deren Erreichen mit $\delta = \varepsilon$ (ε Spulenrichtung des Läufers) und $U_F = U_0 \sin(\varepsilon - \delta) = 0$ gekennzeichnet ist ($\varepsilon - \delta$ Regelabweichung). Eine Methode zur Realisierung der Spannungen U_{21} und U_{22} ist in [3.23] angegeben, ebenso deren Pulsbreitemodulation zur Unterteilung der Periode in 2000 Schritte.

Wegen der Periodizität des Sinus sind Resolver nur eindeutig im Bereich bis $< 180°$. Bei einer mit normalem Aufwand erreichbaren Auflösung von 5 bis 10 Winkelminuten entspricht dies einem translatorischen Meßweg beim Weginkrement 0,01 mm von

$$\frac{180° \cdot 60'/°}{5' \text{ (bis } 10')} \cdot 0{,}01 \text{ mm} = 21{,}6 \cdots 10{,}8 \text{ mm}.$$

Zur Erweiterung des Meßbereichs $> 180°$ gibt es mehrere Möglichkeiten:

- hybride Technik, d.h. bis 180° analoge, jeder Nulldurchgang (Phasensprung) digitale Erfassung (zyklisch-absolute Messung)
- Stufung mit Hilfe eines Getriebes in Grob- (2000 mm), Mittel- (100 mm) und Feinsystem (letzteres auch als Inductosyn), wodurch eine absolute Messung erreicht wird
- Begrenzung der Regelabweichung (Nachlauffehler) der Lageregelung durch hohe dynamische Güte des Kreises auf einen Wert kleiner als $\pm$ 90°, so daß das Meßsystem stets im eindeutigen Bereich arbeitet. Für Anzeigezwecke ist die Sollwert- bzw. die aus der Fehlerspannung abzuleitende Impulsfolge zu summieren.

Letztgenannte Methode wird vorwiegend – auch für Inductosyn – angewendet.

Bei der gestuften Meßmethode [1.1] [3.24] [3.25] (Bild 3.24) wird immer dann in den feineren Bereich umgeschaltet, wenn in diesem Eindeutigkeit herrscht.

3.3.2. Inductosyn

Das 1960 entwickelte, weit verbreitete Inductosyn [3.26] [3.27] mißt direkt. Sein zyklisch-absolutes Wirkprinzip gleicht dem des Drehmelders mit gestreckter Wicklung. Auf der Skale (Abmessungen 250 mm × 58,4 mm × 9,3 mm) sind

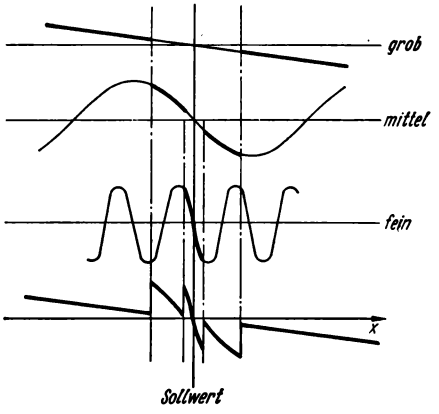


Bild 3.24. Kombination Grob-, Mittel-, Feinsystem $U_F(x)$

mäanderförmige, gedruckte Leiterzüge mit einer Teilung $\tau = 2$ mm angebracht (Bild 3.25). Der Gleiter trägt zwei um 90° el versetzte Leiterschleifen mit 64 bzw. 96 Teilungen, die mit

$$u_{11} = U_1 \sin \omega t \quad \text{und}$$

$$u_{12} = U_1 \sin\left(\omega t + \frac{\tau}{4}\right) = U_1 \cos \omega t \tag{3.9}$$

als Sollwert gespeist werden.

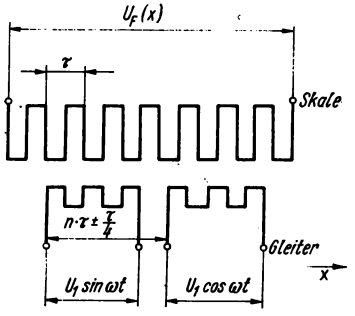


Bild 3.25. Prinzip des Inductosyn

Die Fehlerspannung U_F als geometrische Summe der induzierten Teilspannungen hat die gleiche Form wie U_2 im Bild 3.22, d.h., sie ist durch zwei um π versetzte sinusförmige Hüllkurven gekennzeichnet. Diese ergibt nach phasenrichtiger Demodulation einen sinusförmigen Verlauf von

$$U_F(x) = k\, U_1 \sin \omega t \sin \frac{2\pi x}{\tau}. \tag{3.10}$$

Die Fehlerspannungskurve wird durch die Sollwertvorgabe verschoben und mit einem Nachlaufregelkreis gegen Null geführt. Speist man umgekehrt mit $u_1 = U_1 \sin \omega t$ in die Skale ein, entstehen am Gleiter die Spannungen

$$u_{21}(x) = k\, U_1 \sin \omega t \sin \frac{2\pi x}{\tau}, \quad x \text{ Verschiebung},$$

$$u_{22}(x) = k\, U_1 \sin \omega t \cos \frac{2\pi x}{\tau} \tag{3.11}$$

und somit die gleichen Verhältnisse wie beim Resolver Gl. (3.8).

Der Teilungsfehler (absolute Genauigkeit) für ein 250-mm-Lineal bei 20 °C beträgt $\pm$ (2,5···5) µm. Als Anbaumaße gelten Luftspalt Lineal – Reiter 0,20 $\pm$ 0,05 mm und zulässige Abweichungen von der Längsachse $\pm$ 50 µm. Als Wiederholgenauigkeit werden 0,25 µm genannt.

Für die Kombination Inductosyn – Resolver zum absoluten Messen gelten bezüglich der Speisefrequenz einander widersprechende Forderungen:

– Resolver $f_{opt} \approx 400$ Hz (Eisenkreis)

– Inductosyn $f_{opt} \approx 10$ kHz ($e \sim \mathrm{d}\,\Phi/\mathrm{d}\,t$, eisenlos).

Als Kompromiß sind 1,2···2 kHz üblich [1.1].

Das Rund-Inductosyn hat maximal eine Auflösung von 1000 Perioden und wird an Drehtischen angewendet.

Zur Wandlung des Analogausgangs in digitale Signale s. Abschn. 5.3.3.

4. INTEGRIERTE SCHALTUNGEN, KARTENBAUGRUPPEN, EINSATZBEDINGUNGEN

4.1. Integrierte Schaltkreise

4.1.1. Allgemeines

In der 3. Generation numerischer Steuerungen werden als Bauelemente, d.h. kleinste konstruktiv-funktionell bestimmbare Einheiten, vor allem integrierte Schaltkreise (IC, englisch integrated circuit) eingesetzt, die gegenüber diskretem Aufbau folgende Vorteile bieten:

- größere Packungsdichte, geringeres Volumen (bis zu 75%), weniger Zwischenverbindungen
- verringerter Leistungsbedarf
- höhere Verarbeitungsfrequenz durch kurze Verbindungen im IC
- gesteigerte Zuverlässigkeit, bezogen auf die Grundfunktionen
- verbesserte Ökonomie durch Fertigungsautomatisierung zur Herstellung von IC und der Kartenbaugruppen
- gesteigerte Unempfindlichkeit gegen Umwelteinflüsse.

Dieser Integrationsprozeß in der Elektronik führte über die gedruckte Leiterplatte, die Schicht(Hybrid)technik (KME 3) mit der Planar-Epitaxietechnik zum monolithischen ($\triangleq$ einheitliches Substrat) Schaltkreis (Halbleiterblocktechnik, Schaltkreisfamilien D 10, D 20). Dünnschicht- und IC-Technik werden zum Begriff Mikroelektronik zusammengefaßt, die wegen des technischen Vorbereitungsaufwands nur bei hohen Stückzahlen rentabel ist ($> 10^4$ Stück/TTL-Typ und Jahr).

Die Notwendigkeit zum Beherrschen der Technologie wird dadurch unterstrichen, daß die Wahrscheinlichkeit für die Funktionsfähigkeit eines Schaltkreises mit einer Ausbeute p für ein aktives Element und n Elementen p^n ist. Bei $p = 0{,}9$; $n = 30$ ergäbe sich beispielsweise nur eine Ausbeute von 4%.

Bei den Hybridtechniken werden herkömmliche Bauelemente (Transistor) mit Dünnschicht- oder Dickschichtschaltungen vereint; es wird ein Integrationsgrad bis 40 Elemente je Schaltkreis erreicht.

In TTL-Schaltkreisen sind sowohl Majoritäts- als auch Minoritätsträger am bipolaren Leitungsmechanismus beteiligt. Die unipolaren Feldeffekttransistoren dagegen (s. Abschn. 12.) verwenden nur eine Trägerart (Majoritätsträger), deren Fluß durch Raumladung gesteuert wird.

Das Si-Basismaterial (Substrat) wird bei TTL schichtweise großflächig durch Epitaxie einkristallin erweitert, wobei der Vorgang so gesteuert wird, daß die dotierten Schichten oder die Übergangsstellen zwischen ihnen (pn- bzw. np-Übergänge) die gewünschten Elemente bilden. Blättchen von 1 mm $\times$ 1 mm $\times$ 0,1 mm (englisch chip, Span) können dabei 20 bis 100 Bauelemente tragen. Die Verbindung der so erzeugten Elemente erfolgt unmittelbar durch Drähte oder durch aufgebrachte Metallfilme. Zum Schutz wird der Block mit einer SiO_2-Schicht

(etwa 0,5 µm dick) überzogen. Eng begrenzte Ätzungen (wenige µm) zur Eindiffusion von Störstellen (Dotierung) werden durch Fenster in der Maske aus fotoempfindlichem Lack (Fotoresist) erzeugt (Planartechnik) [3.11].

Daneben ist die reine Diffusions- oder Legierungstechnik technologisch ungünstiger.

Mittlere Integration (MSI, englisch medium scale integration), wie Zähler, Speicher, Decoder, Addierer, Schieberegister u. ä. mit 20 bis 100 Gattern, $\leqq 24$ Anschlüssen, sind in TTL-Technik ökonomisch herstellbar, während für Großintegration (LSI, englisch large scale integration) mit mehreren Verbindungsebenen und 100 bis 3000 Gattern die unipolare Technik günstiger ist. Der Vorteil höherer Integration liegt in dem geringeren Kostenanteil je Gatter bei gleicher Anzahl technologischer Arbeitsgänge und geringfügig höherem Substrat- und Kontaktierungsaufwand.

Die logischen Funktionen werden physikalisch unterschiedlich verwirklicht:

RTL Widerstands-Transistor-Logik mit der Abart
DCTL direktgekoppelte Transistor-Logik
EC(T)L emittergekoppelte Transistor-Logik
DTL Dioden-Transistor-Logik
TTL Transistor-Transistor-Logik.

RTL (Bild 4.1) ist wegen der Widerstände integrationsunfreundlich, hat hohen Leistungsbedarf und große Signalverzögerung. DCTL dagegen eignet sich gut zur Integration, weist geringe Verlustleistung auf, ist wegen niedriger Pegel aber gegen Störungen empfindlich. Wegen der übersteuerten Transistoren tritt eine Vergrößerung der Signalverzögerung ein, und wegen der direkten Kopplung sind die Elemente eng zu tolerieren (Grundelemente: NOR).

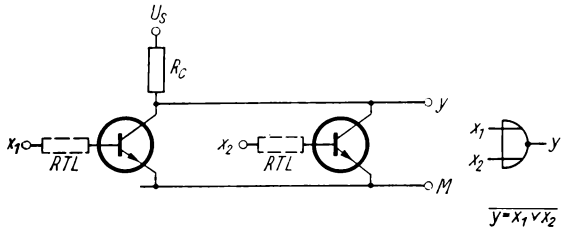


Bild 4.1. RTL-(DCTL)Grundschaltung

Weil die Übersteuerung (Sättigung) der Transistoren bei EC(T)L vermieden ist, erhält man sehr schnelle ($t_v \approx 1$ ns) Schaltungen (Grundelement: NOR).

Bei der DTL-Technik wird der Basiswiderstand durch zwei Hubdioden in Durchlaßrichtung ersetzt, wodurch die Umschaltspannung (Sicherheitsabstand) erhöht wird. Statt dessen führt eine in Sperrichtung geschaltete Zenerdiode (DTLZ-Technik) zur Spannungserhöhung um deren Durchbruchspannung. Konjunktion bzw. Disjunktion sind durch Dioden erreichbar (Grundelement NAND oder NOR). Diese Schaltung ist durch die enthaltenen Dioden und Widerstände sowie wegen der geringen Anzahl von Transistoren wenig integrationsfreundlich. Zur TTL gelangt man (Bild 4.2), wenn die Dioden zur Konjunktion durch die Emitterdioden eines Vielemittertransistors und die Hubdiode durch dessen

Kollektordiode ersetzt werden (Grundelement NAND). Wegen der positiven Betriebsspannung für die npn-Transistoren ist das L-Signal positiv (Positivlogik).

Bei TTL vereinfacht sich das technologische Verfahren, da die logische Verknüpfung nur durch Transistoren realisiert wird. Sie unterscheidet sich von DTL durch ihre größere Schnelligkeit, da vom Multiemittertransistor *T 1* Ladungen an den gesättigten Transistor *T 2* fließen und die Kollektordiode nie im Sperrbereich betrieben werden muß. Der größte Vorteil der TTL ist der leicht herstellbare Gegentaktausgang (s. Bild 4.8), durch den die Ausgangsimpedanzen beider Signalzustände niedrig sind. Kapazitive Störspannungen werden unterdrückt und angeschlossene Kapazitäten sehr rasch umgeladen. Nachteilig ist die schlechte Entkopplung der Eingänge. Da bei höherer Integration die Gegentaktausgänge nur beim Verlassen des Chips benötigt werden, sinkt der Leistungsbedarf, und das Gütekriterium digitaler Schaltungen wird besser: Leistung · Geschwindigkeit → Minimum.

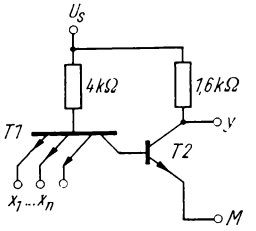


Bild 4.2. TTL-Grundschaltung

Mit Halbleiterblocktechnik können keine Induktivitäten, nur geringe Kapazitäten und Widerstände mit großer Toleranz und Temperaturabhängigkeit sowie hohem Platzbedarf hergestellt werden. Dagegen sind Widerstandsverhältnisse sehr genau realisierbar [4.1].

Viele Schaltkreise in Halbleiterblocktechnik verschiedener Hersteller sind miteinander kompatibel [4.2]. Besondere störsichere Logikfamilien werden bei NC nicht angewendet.

Die ebenfalls interessierende unipolare MOS-Technik (üblicherweise Negativlogik), für sehr hohe Integration (3000 Elemente je Schaltkreis) geeignet, weist gegenüber TTL-Technik eine höhere Verzögerung je Gatter auf (U_S höher, hoher Eingangswiderstand, Störabstand größer, dynamische Störsicherheit schlechter, Oberflächenpassivierung schwierig).

Da TTL-Schaltkreise immer aktive Elemente enthalten, tritt innerhalb der Signallaufkette keine Impulsverschleifung und Pegelabsenkung wie an passiven Elementen ein.

Auf Grund ihrer Geschwindigkeit, ihres Störverhaltens und der Abstimmungen im Rahmen des RGW werden in der DDR für die logischen Funktionen der NC TTL-Schaltungen in NAND-Technik verwendet.

Für das vertiefte Studium wird empfohlen [4.3] bis [4.5].

4.1.2. NAND-Technik

Die der NAND-Technik (englisch negation AND) zugrunde liegende Menge von Funktoren $\{\sim, \wedge\}$ ist funktionell vollständig [4.6], d.h., mit ihr lassen sich alle

klassischen Booleschen Funktionen aus der lexikografischen Ordnung für 2 Variable (16 Kombinationen) realisieren [2.13]. Ohne auf die Umstände einzugehen, gibt Bild 4.3 diese Zusammenhänge wieder. Aus der Disjunktion folgt die vielfache Verwendung negierter Signale.

Für das vertiefte Studium wird empfohlen [2.2] [2.13] [4.6] bis [4.10].

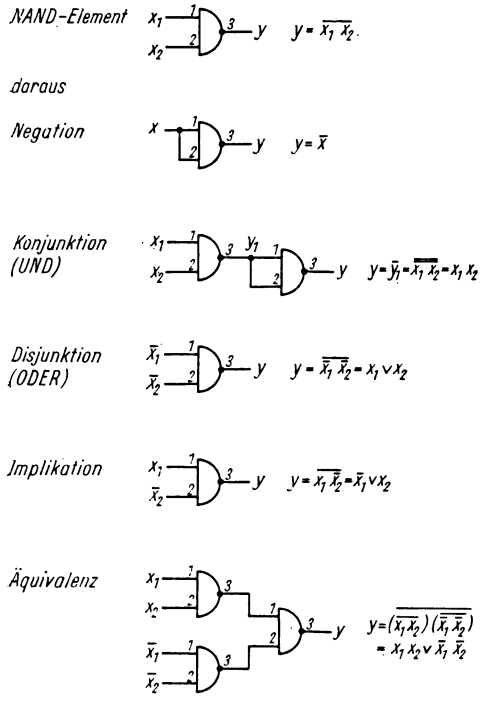


Bild 4.3. Grundfunktionen in NAND-Technik

4.1.3. DDR-Baureihe D 10

4.1.3.1. *Systemparameter*

Nach TGL 24569 werden die Familien wie folgt bezeichnet:

Anfangsbuchstabe

Temperaturbereich	analog	digital	
		bipolar	unipolar
0 ··· 70 °C	A	D	U
— 25 ··· 85 °C	B	E	W
— 55 ··· 125 °C	C	F	Z

1. Ziffer: 1 Standardbaureihe
2 Hochgeschwindigkeitsbaureihe
weitere Ziffern: Bezeichnung des Typs
letzter Buchstabe: C DIL-Gehäuse, Keramikausführung
D desgl., Plastausführung
G Flachgehäuse.

Das DIL(englisch Dual-in line)-Gehäuse nach TGL 26713 hat 6, 8, 10, 14 (Bild 4.4), 16 Anschlüsse (englisch pin) im 7,5-mm-Abstand und 22 oder 24 Anschlüsse im 14-mm-Abstand. Es wird durch die Stiftschultern auf 1,25 mm Abstand von der Leiterplatte gehalten. Das Flachgehäuse G (englisch flat pack) verlangt eine sehr exakte Montagetechnologie, durch die die 28, 44 oder 88 Anschlüsse lagerichtig ohne Führung durch eine Bohrung flach auf den Leiterzug geschweißt bzw. gelötet werden (Reflow-Lötung).

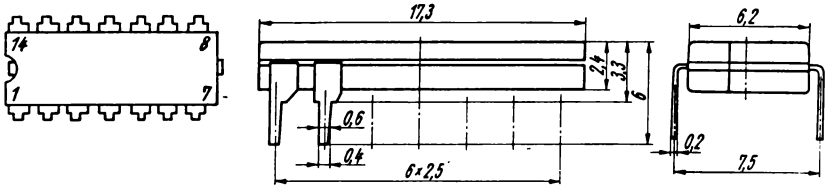


Bild 4.4. DIL-Gehäuse C 14

Allgemeine Daten [4.11] der Reihe D 10
(Die Termini und Buchstabenbezeichnungen entsprechen der RGW-Empfehlung.)

- Eingangsspannung (englisch input) (Dauerbetrieb ist gewährleistet) — $U_I = -0{,}8 \cdots 5{,}5$ V (≙ Grenzwert)
- Speisespannung (englisch source) (Nennwerte der Elemente bleiben erhalten) — $U_S = 4{,}75 \cdots 5{,}25$ V einschl. Welligkeit (Grenzwert 7 V)
- Umgebungstemperatur (englisch ambient) (Arbeitstemperatur) — $\vartheta_a = 0 \cdots 70\,°C$ (≙ Grenzwert)
- Logische Signale (statisch)
  Eingang U_{IL} (englisch low, niedrig) (≙ log. 0 bei positiver Logik TTL; bei negativer Logik ist low ≙ log. L) — $U_{IL} \leqq +0{,}8$ V
  U_{IH} (englisch high, hoch) (≙ log. L bei positiver Logik) — $U_{IH} \geqq +2{,}0$ V
  Ausgang (englisch output) — U_{OL} (≙ log. 0) $\leqq +0{,}4$ V; U_{OH} (≙ log. L) $\geqq +2{,}4$ V
- Ausgangslastfaktor (englisch fan out) — $N_O = 10$ Lasteinheiten ≙ 16 mA
  für Leistungsgatter D 140 C — $N_O = 30$

– Eingangsstrom	$-J_{IL} \leqq 1{,}6$ mA/Eingang $\triangleq$ 1 Lasteinheit (Bild 4.7) $J_{IH} \leqq 40$ µA/Eingang	

Richtungsdefinition: Ströme in den Schaltkreis hinein zählen positiv.

Dynamische Kennwerte nach Bild 4.5 bei $U_S = 5$ V, $\vartheta_a = 25$ °C

– kapazitive Last	$C_0 \leqq 1$ nF	
– Einschaltverzögerungszeit	$t_{DHL} = 4 \cdots 15$ ns (typisch 8 ns)	für D 172 C $\leqq 50$ ns
– Ausschaltverzögerungszeit	$t_{DLH} = 6 \cdots 22$ ns (typisch 18 ns)	$\leqq 50$ ns
– mittlere Signalverzögerungszeit (englisch propagation delay time)	$t_{pd} = \frac{t_{DHL} + t_{DLH}}{2}$ (typisch 13 ns)	

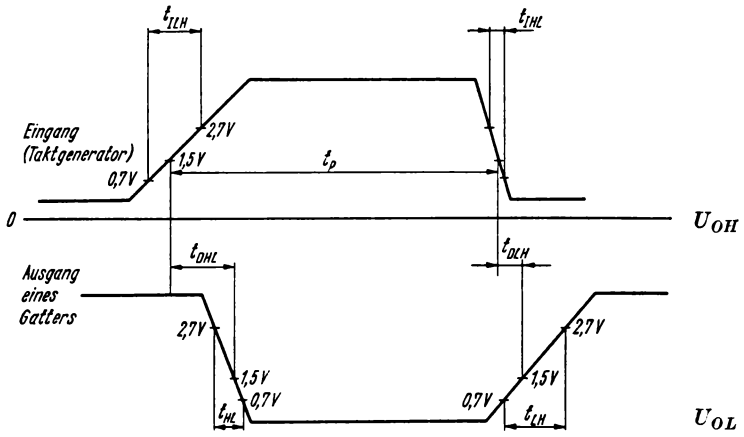


Bild 4.5. Dynamische Kennwerte

Aus der Schaltkennlinie (Bild 4.6) sind Parameterabweichung und Streubereich eines Typs zu erkennen.

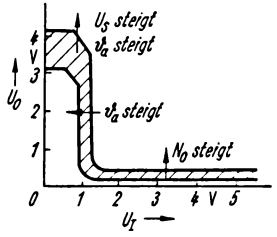


Bild 4.6. Schaltkennlinie $U_0 = f(U_I)$

Die statischen Eingangs- und Ausgangskennlinien der Gatter nach Bild 4.7 sind nichtlinear. Ihre Kenntnis ist zur Dimensionierung von Ergänzungsschaltungen mit teilweise diskretem Aufbau nötig.

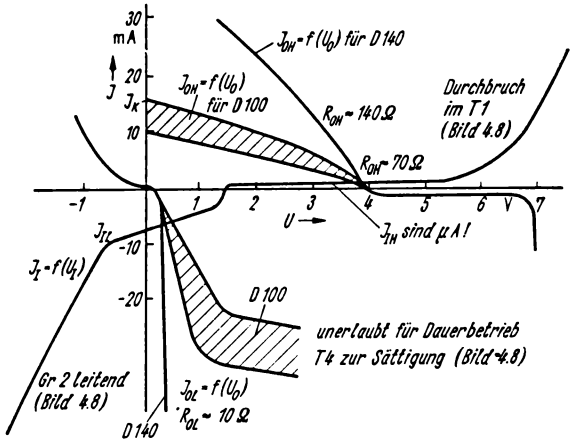


Bild 4.7. Eingangs-Ausgangs-Kennlinien integrierter Schaltkreise

Der statische Störabstand beträgt $U_{IL} - U_{OL} = U_{OH} - U_{IH} \geqq 0{,}4$ V. Bei negativer Spannung $U_{IL} < -0{,}8$ V tritt die Diodencharakteristik (*Gr 2* im Bild 4.8) ein, und P_v steigt stark an.

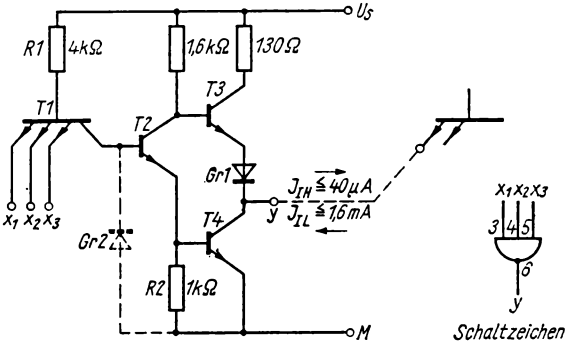


Bild 4.8. NAND mit 3 Eingängen, Innenschaltung (D 110)

4.1.3.2. *Typenübersicht der TTL-Standardbaureihe*

In Einfachintegration SSI (englisch small scale integration) sind ausgeführt [4.4] (Klammerangabe Typ der UdSSR):

TGL 26152		
D 100 (1 ЛБ 553)	4 NAND mit je 2 Eingängen	$y = \overline{x_1 x_2}$
D 110 (1 ЛБ 554)	3 NAND mit je 3 Eingängen	$y = \overline{x_1 x_2 x_3}$
D 120 (1 ЛБ 551)	2 NAND mit je 4 Eingängen	$y = \overline{x_1 x_2 x_3 x_4}$
D 130 (1 ЛБ 552)	1 NAND mit je 8 Eingängen	$y = \overline{x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 x_6 x_7 x_8}$
D 140 (1 ЛБ 556)	2 Leistungs-NAND mit je 4 Eingängen	$y = \overline{x_1 x_2 x_3 x_4}$ $N_O = 30$
TGL 26153		
D 150 (1 ЛР 551)	2 UND-ODER-Invert-Gatter mit je 2×2 Eingängen, Expandereingang an einem Gatter	$y = \overline{x_1 x_2 \vee x_3 x_4 \vee X_{\mathrm{D}160}}$
D 151	desgl., nicht expandierbar	
D 160 (1 ЛР 551)	2 Expander mit je 4 Eingängen, nur mit D 150 und D 153 verwendbar	$X_{\mathrm{D}160} = x_1 x_2 x_3 x_4$
TGL 27148		
D 103	4 NAND mit je 2 Eingängen und offenem Kollektorausgang	$y = \overline{x_1 x_2}$
D 153. (ЛПР 553)	UND-ODER-Invert-Gatter mit 4×2 Eingängen und Expander- eingängen	$y = \overline{x_1 x_2 \vee x_3 x_4 \vee x_5 x_6 \vee x_7 x_8 \vee X_{\mathrm{D}160}}$
D 154	desgl., nicht expandierbar	
TGL 27977 D 172 (1 TK 551)	JK-Master-Slave-Flipflop	

Zur mittleren Integration (MSI) zählen:

TGL 28467 D 195	4-bit-Rechts-Links-Schieberegister
TGL 28468 D 191	8-bit-Schieberegister
D 181	16-bit-Speicher
D 189	64-bit-Speicher
D 180	Paritätsgenerator
D 192	dekadischer synchroner VR-Zähler
D 193	binärer synchroner 4-bit-VR-Zähler
D 146/D147	BCD-7-Segment-Anzeige-Ansteuer- schaltung
MH 7447 (ČSSR)	BCD-Dezimal-Decodierer und Treiber für gasgefüllte Anzeige- röhren.

4.1.3.3. *Erläuterungen zu den digitalen Schaltkreisen*

Die *NAND-Schaltkreise* D 100 bis D 130 haben gleichen Grundaufbau (Bild 4.8). Sind alle Eingänge mit H-Pegel (log. L) beaufschlagt, wird *T1* invers betrieben, d.h., der Kollektor wird zum Emitter (Emitterdioden in Sperrichtung), woraus ein sehr flacher Kennlinienverlauf (s. Bild 4.7) mit einem dynamischen Eingangswiderstand von 2 bis 3 M Ω folgt. Der geringe $J_{IH} \leqq 40\ \mu A$ resultiert aus der geringen Spannungsverstärkung $\beta \approx 0{,}1$, der Basisstrom ist um den Faktor der sehr kleinen inversen Stromverstärkung höher. Da *T2* ohne Basisbeschaltung arbeitet, ist die Zeitkonstante gering. Über *T2* wird *T4* durch Potentialanhebung am Emitterwiderstand *R2* ebenfalls durchgesteuert $\Rightarrow y =$ L-Pegel ($\triangleq$ log. 0), wobei U_{OL} durch $U_{BE\,\mathrm{Rest}}$ von *T4* bestimmt wird ($R_{OL} \approx 10 \cdots 15\ \Omega$). *T3* arbeitet im Verstärkungsbereich und wird durch *T2* gemeinsam mit der Flußspannung von *Gr1* (0,8 ··· 1 V) nahezu nichtleitend. Die Ausgangskennlinie im Bild 4.7 zeigt den geringen Widerstand für L-Pegel (10 ··· 20 Ω).

Ein x_i auf L-Pegel ($\triangleq$ log. 0) läßt *T1* in die Sättigung eintreten (Emitterverstärker), *T2* bleibt gesperrt. Der Eingangswiderstand von etwa 4 kΩ wird durch *R1* bestimmt, d.h. flacher Verlauf der Eingangskennlinie. Mit durchgesteuertem *T3* wird *y* auf H-Pegel gehoben.

Die Ausgangskennlinie für H-Pegel zeigt eine Neigung entsprechend $R_{OH} \approx 130$ bis 140 Ω, die Leerlaufspannung $U_{OH} = U_S - U_{BE3} - U_{F\,\mathrm{Diode}} \approx 3{,}6$ V. Die Emittereingänge von *T1* bewirken die UND-Verknüpfung, deren Negation in *T2* erfolgt.

Zwischen L- und H-Pegel werden bei $U_I \approx 1{,}4$ V beide Gegentaktausgänge leitend, und es entsteht der nur vom dynamischen Widerstand 1 kΩ begrenzte Kurzschlußstrom (s. Abschn. 4.4.2.) von $\leqq 20$ mA/Schaltkreis ($di/dt \leqq 4$ mA/ns [4.2] führt zum Spannungseinbruch).

Das *Leistungsgatter* D 140 erhält statt *T3* (Bild 4.8) eine Darlingtonschaltung *T3*, *T5* gemäß Bild 4.9.

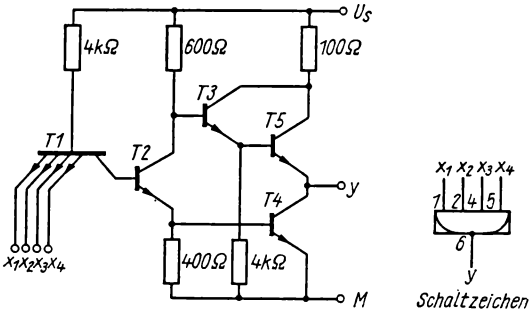


Bild 4.9. Leistungsgatter, Innenschaltung (D 140)

Bei den *UND-ODER-Invert-Gattern* D 150, D 153 werden zwei Grundschaltungen disjunktiv verknüpft (Bild 4.10). Die Schaltzeiten werden durch kapazitive Belastung der Expandereingänge stark vergrößert.

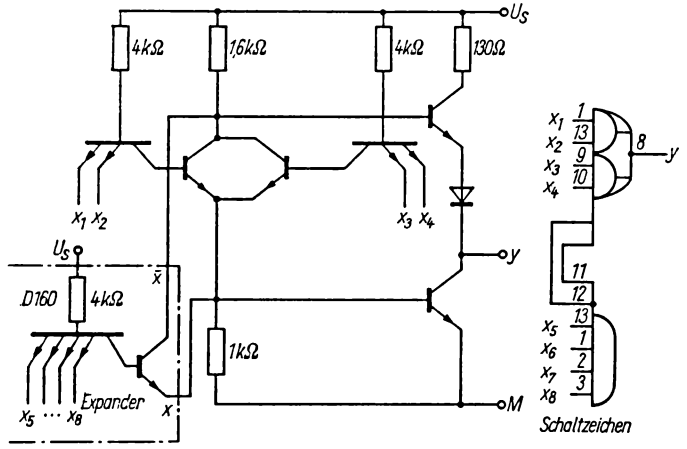


Bild 4.10. UND-ODER-Invert-Gatter mit Expander, Innenschaltung (D 150, D 160)

Nur die Gatter des D 103 (Bild 4.11) können ausgangsseitig parallelgeschaltet und müssen mit R_L versehen werden [4.12].

Gatterzahl	i	N_O	R_L in Ω [4.1]
	1	9	3030 ··· 3850
	4	8	1510 ··· 1780
	8	7	1010 ··· 1030
	14	5	606 ··· 635
	21	3	433 ··· 438
	30	1	337 ··· 346

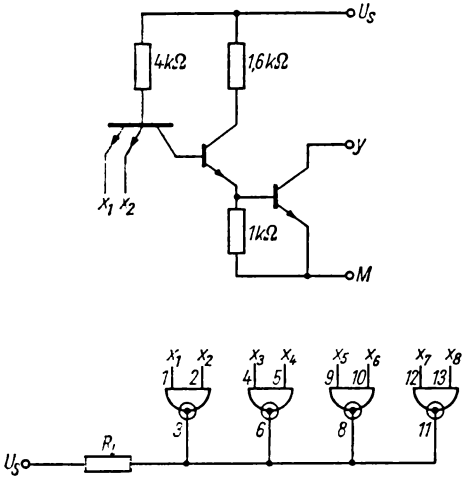
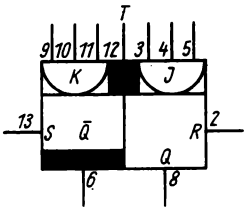


Bild 4.11. NAND mit offenem Kollektor (D 103)

Mit dem Gatter ist die externe Konjunktion bzw. die negierte Disjunktion zu verwirklichen.

Das *Flipflop* D 172 ist eine taktzustandsgesteuerte *JK*-Master-Slave(englisch Meister–Knecht)-Kippstufe mit einer Frequenz von $f_{\text{Clock}} = 10\,\text{MHz}$ ($C_L = 15\,\text{pF}$; $R_L = 400\ \Omega$). Im Buch wird die Darstellung gemäß Bild 4.12 gewählt, die den Vorteil hat, daß die Eingänge den Ausgängen auch optisch zugeordnet sind.



t_n		t_{n+1}
J	K	Q
0	0	Q_n
0	L	0
L	0	1
L	L	$\bar{Q}_n$

Zustandstabelle

Bild 4.12. JK-Master-Slave-Flipflop (D 172)

Unabhängig vom Takt setzen

Eingang $S = 0 \rightarrow Q = \text{L}$ (englisch set); $t_{pS} = t_{pR} \geqq 25$ ns

Eingang $R = 0 \rightarrow Q = 0$ (englisch reset), $t_{set\,up} \geqq t_{pT} = 20$ ns mit der Bedingung $R = S \neq 0$.

Die Zweiflankensteuerung verläuft vierstufig nach Bild 4.13.

1 Entkoppeln von Master und Slave, d.h. der beiden *RS*-FF (Bild 4.14) durch die Transfertransistoren *5*, *6*, womit das Ausgangssignal bis zur Umschaltung erhalten bleibt

2 Aufruf der *JK*-Eingänge (*1*; *10*), Einspeichern in den Master (*4*; *7* mit den Toren *3* und *8*)

3 Sperren der *JK*-Eingänge an *1* und *10*

4 Übertragen der Information vom Master an den Slave (*2*; *9*) über die Transfertransistoren *5* und *6*.

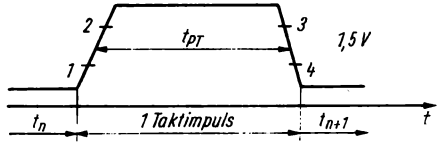


Bild 4.13. Taktimpuls

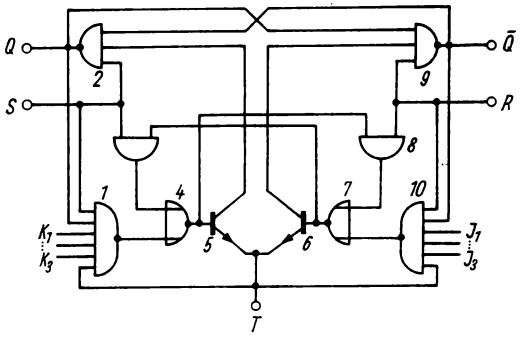


Bild 4.14. Innenschaltung FF (D 172)

Damit steht das Ausgangssignal gemäß Funktionstabelle an.

Das *4-bit-Rechts-Links-Schieberegister* D 195 (Bild 4.15) hat eine maximale Schiebefrequenz von 30 MHz, $t_{DHL} = t_{DLH} \leqq 35$ ns.

Das *8-bit-Schieberegister* D 191 (Bild 4.16) hat serielle Ein- und Ausgänge. Nach 8 Takten wird bei $A = B = \mathrm{L} \Rightarrow Q = \mathrm{L}$, $f_{max} = 18$ MHz. Verzögerungszeit $t_{DHL} = t_{DLH} \leqq 40$ ns.

Die *Speicher* D 181 (Bild 4.17) und D 189 (Matrixanordnung) enthalten 2 Schreib- und 2 Leseverstärker, direkte Adressierung und nicht zerstörende Lesung (RAM).

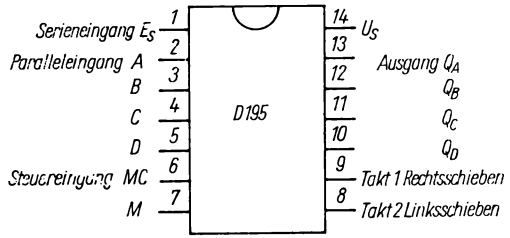


Bild 4.15. 4-bit-Rechts-Links-Schieberegister

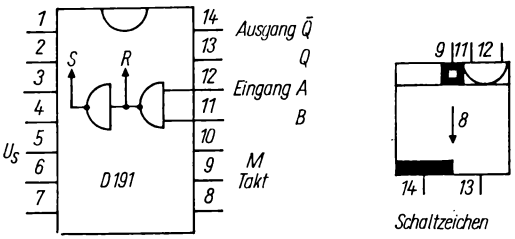


Bild 4.16. 8-bit-Schieberegister

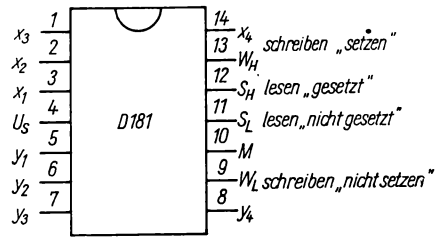


Bild 4.17. 16-bit-Speicher

Der *Paritätsgenerator* D 180 (Bild 4.18) prüft 8 Eingänge auf ungeradzahlige bzw. geradzahlige Summe.

Die synchronen *VR-Zähler* D 192 (dekadisch) und D 193 (dual), Bild 4.19, enthalten vier FF. Beim Erreichen der Endstellungen *9* bzw. *15* wird der nächste Impuls an den Übertragungsausgang geleitet und der Zähler auf Null zurückgesetzt. Die Zähler sind an *A* bis *D* voreinstellbar und als Teiler $1/n$ einsetzbar, indem an *A* bis *D* die Zahl $10 - n$ bzw. $16 - n$ angelegt wird. Die maximale Zählfrequenz beträgt $\geqq 25$ MHz.

Die Schaltkreise D 146, D 147 (Bild 4.20) liefern für die Lumineszenzanzeige mit 20 mA Sondenstrom die Decodierung und den Treiberstrom, Ausgangsspannung 30 bzw. 15 V.

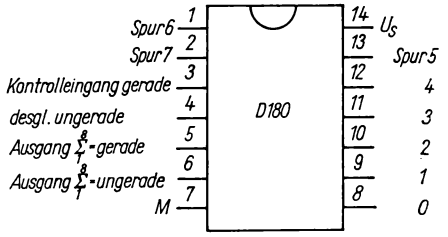


Bild 4.18. Paritätsgenerator

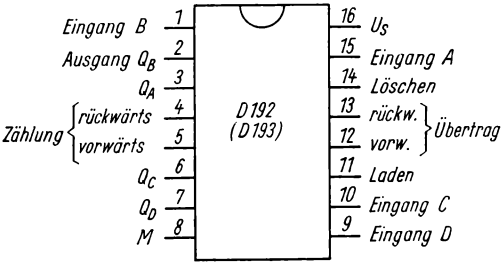


Bild 4.19. Synchrone VR-Zähler, dekadisch (dual)

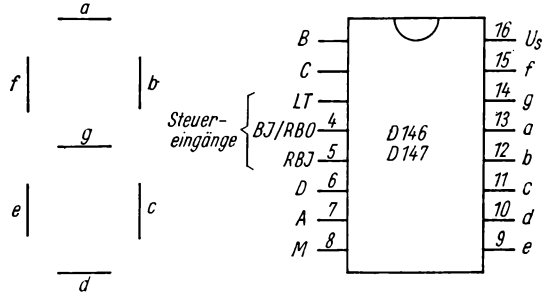


Bild 4.20. Ansteuerung 7-Segmentanzeige

Der Baustein MH 7441 der ČSSR (Bild 4.21) decodiert aus einem BCD-Eingangs-Quadrupel ($^{10}_{1}$)-Ausgänge mit maximal 55 V Ausgangsspannung zur direkten Ansteuerung von gasgefüllten Kaltkatodenanzeigeröhren ($P_V = 105$ mW, Brennspannung der Röhren ≈ 140 V).

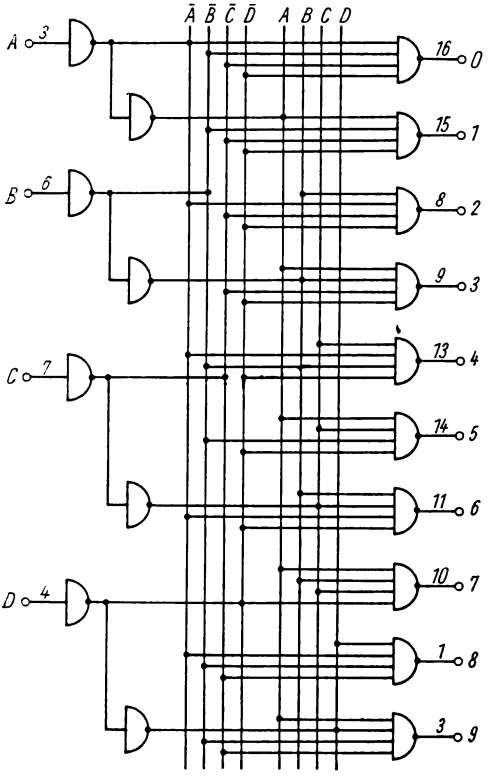


Bild 4.21
BCD-Dezimal-Decodierer

4.1.3.4. *Zusammenschaltbedingungen* [4.11] [4.13]

Die Zusammenschaltung der TTL-Schaltkreise ist einfach:

- Ausgänge können mit 1 bis 10 (30 beim D 140) beliebigen Lasteinheiten beschaltet werden.
- Zur Einhaltung der Forderung nach einer Spannungsdifferenz (Bild 4.8) $\leqq$ 5,5 V zwischen den Emittereingängen von *T1* werden die freien Eingänge

  parallel zu den benutzten Eingängen geschaltet (bleibt 1 Lasteinheit). Dadurch ändern sich die Zeitverhältnisse nur unwesentlich [4.14], die zulässige Koppelkapazität sinkt um etwa 10% oder

  aus einer unabhängigen Spannungsquelle von 2,4 bis 3,5 V gespeist (erhöhter Aufwand, 2- bis 3fach größere Verzögerung) oder

  an U_s über $R = 1$ kΩ (1 Widerstand für 1 bis 25 Anschlüsse) angeschlossen (Begrenzung des Durchbruchstroms an *T1* auf $\leqq$ 1 mA, Bild 4.7 rechts).

Bemerkung: Bei direktem Anschluß an U_S könnte J_{IL} von 1,6 auf 2,6 mA ansteigen, und negative Überschwinger durch Reflexion sind dann unzulässig. Bei Baukastenaufbau kommt für teilweise freie Eingänge entsprechender Ausbaustufen nur die externe Beschaltung meist über Widerstand in Frage.

- Unbenutzte R-, S-Eingänge sind an U_S zu legen.
- Sind alle J-, K-Eingänge unbenutzt, können diese an U_S gelegt werden.
- Eingänge unbenutzter Gatter werden an definiertes Logiksignal gelegt.
- Außer am D 103 dürfen keine Ausgänge unterschiedlicher Gatter parallelgeschaltet werden.
  Ausgänge dürfen an eine Spannung von 4 · · · 5,5 V gelegt werden, da sie dabei hochohmig werden [4.1].

Die zulässige Grenzlaufzeit für in Reihe geschaltete Bauelemente gleichen Typs (IC) ergibt bei 20% Sicherheit eine zulässige Reihenschaltung von 36 BE [4.15], bezogen auf 2 MHz.

4.1.4. Analoge Schaltkreise [4.12]

Als Gütekriterium analoger Schaltkreise gilt

Verstärkung · Bandbreite → Maximum.

Der *Komparator* A 110 (Vergleicher, Bild 4.22) vergleicht zwei Spannungen und schaltet je nach Spannungsrichtung den Ausgang bei $|\Delta U| \leqq 5$ mV (typisch 1,6 mV) auf logisch 0 oder L ($U_{E3} > U_{E4} \Rightarrow$ L-Signal).

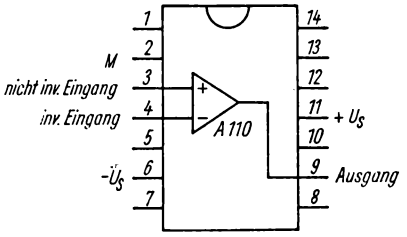


Bild 4.22. Komparator

Spezielle Daten

Verzögerungszeit bei $\Delta U = 100$ mV	$t_V \approx 40$ ns
differentielle Eingangsspannung	$U_{ID} = \pm 5$ V
differentielle Eingangs-offset-Spannung	$U_{IO} \leqq 7{,}5$ mV
($R_s = 100\ \Omega$)	(offset = P-Abweichung, Drift, bleibende Regelabweichung)
Großsignalspannungsverstärkung	$V_u \geqq 1000$ (typisch 1500)
R_O	$= 200\ \Omega$
Gleichtaktunterdrückung	> 70 dB (typisch 98).

Der *Operationsverstärker* A 109 (Bild 4.23) hat hochohmigen differentiellen Eingang, niederohmigen, asymmetrischen Ausgang (Bild 4.24).

Spezielle Daten

differentielle Eingangsspannung $U_{ID} = \pm 5$ V (bezogen auf den anderen Eingang)

Eingangs-offset-Spannung $U_{IO} \leqq 7{,}5$ mV

Anstiegszeit $t_R \leqq 1$ µs

$$I_I \leqq 1{,}5\ \mu A;\ P_{VL} \leqq 300\ mW;\ R_I \leqq 250\ k\Omega;\ R_O \approx 150\ \Omega\,.$$

Die Frequenzkompensation gestattet stabilen Betrieb in weiten Grenzen, die Gegenkopplung stellt V_u (Großsignalverstärkung) ein.

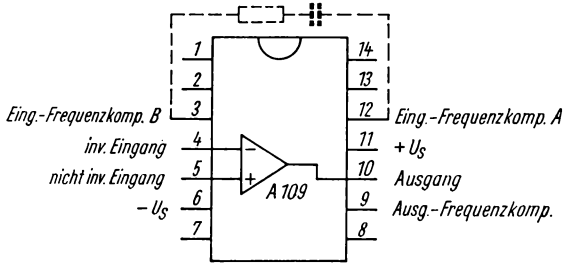


Bild 4.23 Operationsverstärker

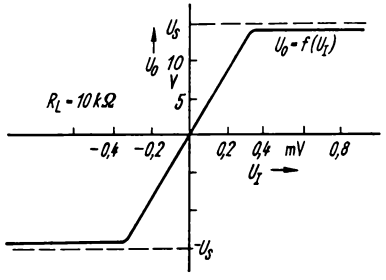


Bild 4.24. Eingangs-Ausgangs-Kennlinie des A 109

Für den nichtinvertierenden Verstärker nach Bild 4.25 [4.1] gilt $U_O = U_I\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$, bei $R_2 = 0$, $R_1 \to \infty$ entsteht ein Spannungsfolger.

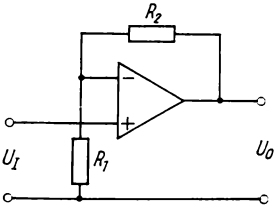


Bild 4.25. Nichtinvertierender Verstärker

Beim invertierenden Verstärker nach Bild 4.26 gilt $U_O = -\frac{R_2}{R_1} U_I$. Die Summenschaltung (Bild 4.26) $U_O = -\sum_1^n \frac{R_2}{R_{1n}} \cdot U_{In}$ stellt die Grundlage des DA-Wandlers dar, wenn die R_{1n} entsprechend bewertet werden.

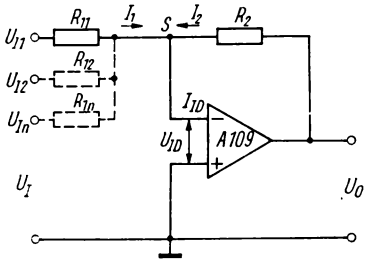


Bild 4.26. Invertierender Verstärker

Ein integrierter *Spannungsregler* (Bild 4.27) dient zur Stabilisierung von positiven oder negativen Gleichspannungen in Reihen- oder Parallelschaltung mit Strombegrenzung und Stromüberwachung (Bild 4.28).

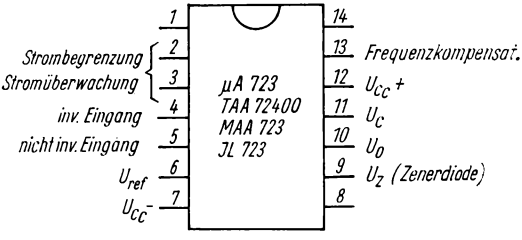


Bild 4.27. Spannungsregler

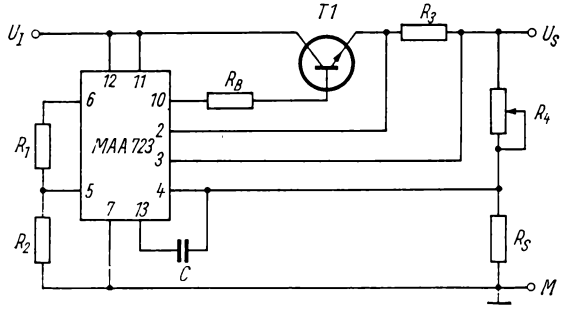


Bild 4.28. Spannungsregelung (positive Spannung)

Spezielle Daten	
I_O	$\leqq 150$ mA
P_{tot} (Verlustleistung)	$\leqq 800$ mW
Ausgangsspannungsbereich	$U_O = 2 \cdots 37$ V
Eingangsspannungsbereich	$U_I = 9{,}5 \cdots 40$ V
stabilisierbare Spannung mit Zenerdiode in schwimmender Anordnung	$-250 \cdots +250$ V

4.2. Ergänzungsschaltungen

Zur Erweiterung des verfügbaren Sortiments an integrierten Schaltkreisen sind z. T. einstellbare Sonderschaltungen unter teilweiser Verwendung diskreter Bauelemente nötig:

- *Eingangsglieder*, wie Pegelanpassungen; Pegelanpassungsverstärker; Prellunterdrückungsschaltungen
- *Ausgangsglieder*, wie Schaltverstärker 30 V/100 mA, 60 V/500 mA
- *monostabile Multivibratoren* (Zeitstufen)
- *astabile Multivibratoren* einschl. quarzstabilisierte Ausführung.

Die Ergänzungsschaltungen sollen möglichst ohne zusätzliche Spannungen auskommen und mit TTL-Schaltkreisen voll kompatibel sein. Bei ihrer Dimensionierung ist zu beachten, daß die verwendeten IC nicht ausschließlich digital beansprucht werden und damit analoge Erscheinungen, wie Temperaturgang, Drift, Kennlinienverlauf und Parameterstreuung, Beachtung finden müssen. Die Ergänzungsschaltungen werden im Abschn. 5. behandelt.

4.3. Störsicherheit

4.3.1. Allgemeines

Untersuchungen zur Störsicherheit gewinnen bei Systemen mit IC wegen des geringen Leistungsniveaus und der niedrigen Signalverzögerungszeit (etwa 13 ns) stark an Bedeutung; denn der eine Störung hervorrufende Impuls (Spannungs-Zeit-Fläche) liegt nur in der Größenordnung von 1 nVs [4.16].

Man muß bei der Betrachtung zwischen internen (systemeigenen) und externen (Fremdfeld-) Störungen unterscheiden. Letztere sind schwer zu erfassen, weil ihre Form und Größe vielfach von nicht reproduzierbaren, örtlich verschiedenen Faktoren abhängen.

Um externe Störungen zu vermeiden, sind folgende Maßnahmen geboten:

- Siebung in der Stromversorgung (Netzeinflüsse)
- Abschirmung und Prellunterdrückung auf signalführenden Zuleitungen, eventuell höherer Signalpegel (DTLZ), angepaßte Treiber- und Empfängerschaltungen (Fremdfelder)
- sternförmige Erdung der Anlageteile (Vermeiden galvanischer Einkopplung vagabundierender Ströme)
- räumliche Trennung der TTL von Starkstrombauteilen, galvanische Trennung der Ausgänge (Gekorelais, Fotokoppler, Triacs)

– Abschirmung der gesamten Anlage durch einen Metallkäfig, auf dem Laufzeit und Stromstärke unkritisch sein müssen.

Interne Störungen sind

– Impulszacken (englisch spikes) durch statische bzw. dynamische Kurzschlüsse beim Schalten von Gattern, durch Leitungsaufladung und kapazitive Lasten
– Auftreten von Reflexionen
– Kopplungsstörungen.

Die in den Steuerungen gewählte synchrone (taktflankengesteuerte) Arbeitsweise bewirkt, daß erst nach Abklingen der Einschwingvorgänge innerhalb der logischen Verknüpfung das Signal in die FF-Speicher übernommen wird (Speicherung durch Rückkoppeln hebt diesen Vorteil auf!). Gefährdet bleiben die ständig aktiven *R*-, *S*- und Taktleitungen, die jederzeit den Signalzustand ändern können und daher auch besonders zu behandeln sind.

Unter statischem Störabstand (stat. Störschwelle, stat. Störungsgrenze) versteht man die zulässige Störspannung U_{St} zusätzlich zum Eingangssignal, ohne daß ein Gatter schaltet, wobei die Störpegel sich erst in Zeiten merklich abbauen, die größer als die Paarlaufzeit der Gatter (Impulsbreite $> 2\,t_D$, doppelte Signalverzögerungszeit) sind [4.1] [4.17] [4.18].

Die Störsicherheit bezieht man auf Worst-case-Bedingungen (englisch, schlechtester Fall).

Bei IC-Elementen wird eine statische Störsicherheit von 0,4 V garantiert, z. B.

$$U_{IH} \geqq 2\,\text{V};\ U_{OH} \geqq 2{,}4\,\text{V} \rightarrow U_{OH\,\min} - U_{IH\,\min} = 0{,}4\,\text{V}$$

Die dynamische Störspannung, deren Wirkungsdauer $< 2\,t_D$ ist, darf z. B. bei 10 ns 2 V, bei 15 ns 1,2 V [4.13] erreichen. Mit steigender Versorgungsspannung nimmt die Störempfindlichkeit ab [4.16], grafische Methoden zur Störspannungsermittlung s. [4.17] [4.18].

4.3.2. Störungen durch Signalumschaltung

Nichtsystemeigene Flanken [4.19] bis [4.22] am IC-Eingang vergrößern Störimpulsamplitude und -breite bei Erhöhung der Anstiegszeit. Bei 1,4 V neigt der Schaltkreis bei Flankenzeiten > 500 ns zu Schwingungen (negativer Widerstand).

Der Signalwechsel am Gegentaktausgang bringt auch bei systemeigenen Flanken für $\leqq 20$ ns einen dynamischen Kurzschlußstrom von 30 mA (50 mA) für Gatter (D 140), bis die Ladung des in den gesperrten Zustand überzuführenden Transistors vom Gegentransistor abgebaut ist, worin die kurzen Schaltzeiten der TTL-Technik begründet sind. Bei $Z = 50\,\Omega$ liegen die Spitzenströme bei $-I_O \approx 20$ mA, $+I_O \approx 60$ mA [4.23].

Umladungen von Leitungen und Gattereingangskapazitäten von $\leqq 4$ pF/Eingang ergeben Ladespitzen von $I_L \approx \dfrac{U}{Z + R_c} \approx \dfrac{4}{2 \cdot 100} \triangleq 20\,\text{mA}$, ungedämpfte Entladespitzen von $I_E \approx \dfrac{U}{Z} \approx 40$ mA.

Die genannten Stromspitzen bewirken auf den Stromzuführungen Spannungseinbrüche, die wegen $\Delta u = -L\dfrac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$ und großem $\dfrac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} \approx \dfrac{5\,\text{mA}}{\text{ns}}$ schon bei kleinen Induktivitäten den zulässigen Wert von 200 mV überschreiten (Bild 4.29).

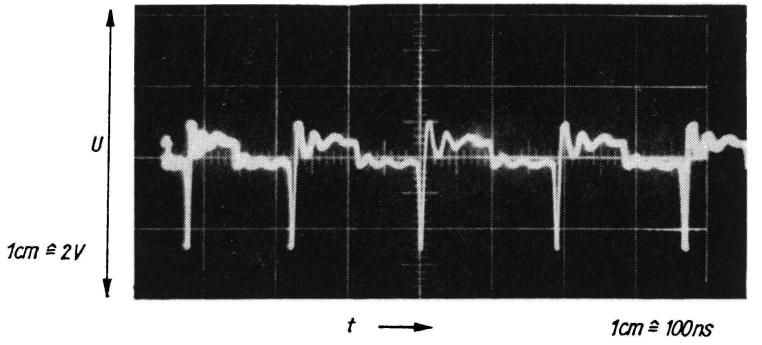


Bild 4.29. Spikes am Leistungsgatter ohne Stützkondensator

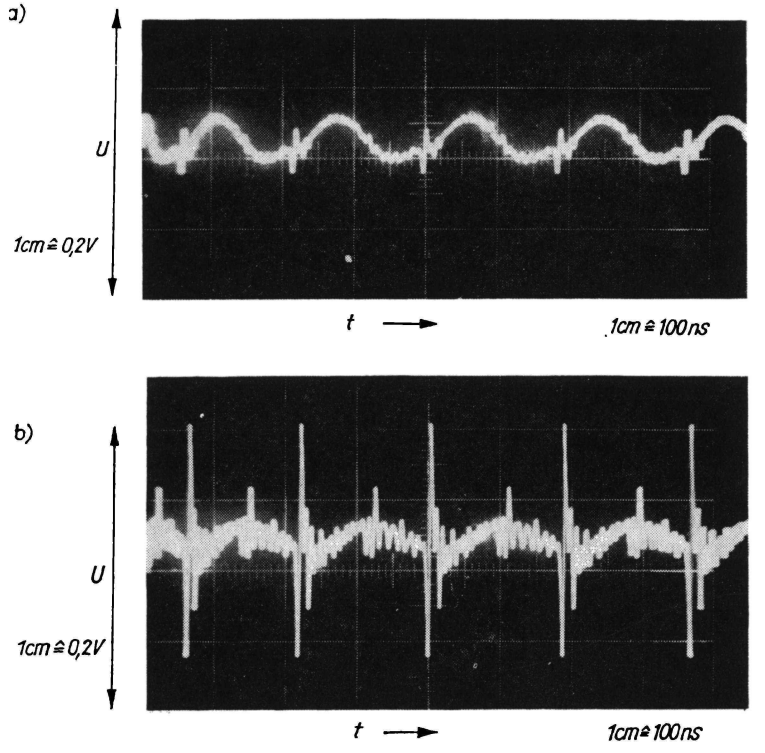


Bild 4.30. Spikes am Leistungsgatter mit Stützkondensator

a) 1 Kondensator je Gatter

b) 1 Kondensator je 2 Gatter

Induktivitätsarme Keramik-Stützkondensatoren (TGL 24099) liefern die Umladeenergie. Ein Kondensator 22 nF ($C_{min} \geqq 10$ nF ist zu garantieren) für zwei NAND-Gatter bzw. für ein Leistungsgatter begrenzt die Spikes nach Bild 4.30.

Die Anordnung der Stromversorgung nach Bild 4.31 erzielt kleinen Wellenwiderstand

$$Z \approx \sqrt{\frac{L'}{C'}}.$$

Kleine Induktivität L heißt großflächig, kurz, große Kapazität bedeutet großflächig, U_S und Masse dicht nebeneinander und große Träger-Dielektrizitätskonstante.

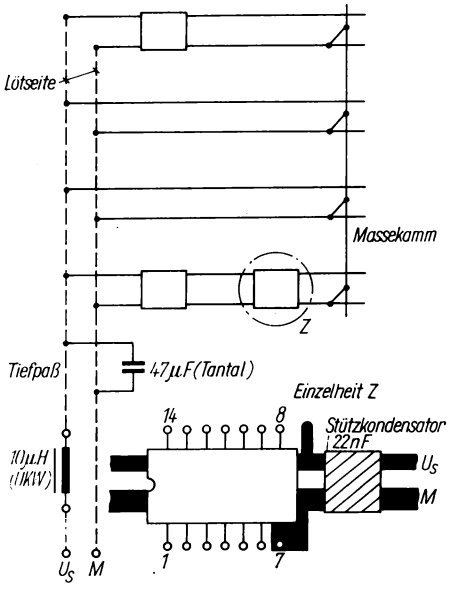


Bild 4.31. Stromschienen- und Stützkondensator (Bestückungsseite)

Z liegt bei Zweiebenenschaltungen (1,5 mm Dicke) und U_S und M auf gleicher Seite etwa bei 100 Ω, besonders kleine Wellenwiderstände von 20 Ω ergeben sich bei Mehrlagenschaltungen mit Masseebenen.

4.3.3. Reflexionen [4.18] [4.20] [4.23]

Bei Wellenwiderstandssprüngen in Übertragungsleitungen (Verzweigungen, Leitungsabschluß) wird ein Teil r (Reflexionsfaktor) des Signals reflektiert.

$$r = \frac{W - Z}{W + Z} \in [-1;\ 1];$$

W Wellenwiderstand bei Veränderung, Abschlußwiderstand

Z Wellenwiderstand der homogenen Leitung.

Reflexionen sind beachtenswert, wenn die rücklaufende Welle nicht verformend in die Schaltflanke des Senders fällt [4.1] [4.18]. Bei TTL-Anstiegszeiten von $t_{HL} \approx 5$ ns und $t_{LH} \approx 10$ ns sowie Geschwindigkeiten von 15 bis 22 cm/ns liegen die Reflexionen z.T. außerhalb der Schaltflanken ($2\,t_V \geqq t_{HL}$). Bei Leitungslängen von 25 bis 100 cm treten gedämpfte Schwingungen, darüber große Reflexionen auf [4.18] [4.20]. Durch Reflexion können positive Überschwinger ($> 1{,}4$ V, $t_p \geqq 20$ ns) zu doppeltem Schalten eines FF führen (Bild 4.32). Leitungen ab 40 cm Länge sind gefährdet, ihre Belastung soll möglichst klein sein.

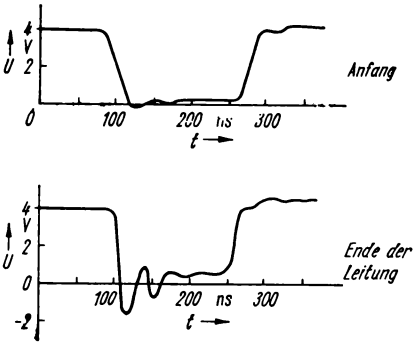


Bild 4.32. Spannungsverlauf am Leitungsanfang und -ende, unverzweigte Leitung [4.2]

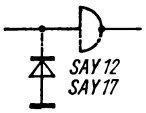


Bild 4.33. Clampingdiode

Negatives Überschwingen ist zulässig, wenn kein zweiter Gattereingang an U_S liegt, sonst kann die Spannung zwischen den Emittern $> 5{,}5$ V werden (s. Abschn. 4.1.2.4.). Eine schnelle niederohmige Schutzdiode (englisch clamping, Signalpegelblockierung) kann die negative Spitze (außer beim FF) begrenzen (Bild 4.33). FF werden niederohmig, da beide Transfertransistoren leitend werden (Q und $\bar{Q} \Rightarrow$ log. L, Zeitverzögerung).

Die Spannungsüberhöhung bei L/H kann theoretisch ein Vielfaches der ursprünglichen Amplitude betragen [4.24].

Bis zu $l_{ges} = 2$ m sind keine Störungen, wohl aber Verzögerungen und Impulsverschleifungen zu erwarten. Signalleitungen sollen $Z = 120\ \Omega$ und nicht $75\ \Omega$ aufweisen. Bei Signalübertragung von außerhalb erreicht man durch Anpassung optimalen Leistungsumsatz und damit Störsicherheit. Eingangsseitige Anpassung an eine Leitung kann durch eine Spannungsteilerschaltung $U_S - R$-Gattereingang $- R - M$ mit $R \geqq 390\ \Omega$ (beim D 140 $R \geqq 120\ \Omega$) [4.1], ausgangsseitige durch einen Längswiderstand von 60 bis 120 Ω [4.21], der den Pegel verschlechtert, erzielt werden.

4.3.4. Kopplungen [4.18] [4.22] [4.25] [4.26]

Kopplungen können galvanisch, kapazitiv oder induktiv verursacht werden und bewirken ein „Übersprechen". Die genannten Stromspitzen (s. Abschn. 4.3.2.) bewirken Spannungsabfälle, die sich galvanisch auf benachbarte Gatter auswirken (Bild 4.34). Zum Erzielen kleiner Induktivität gilt das dort Gesagte. Gleiche Wirkung hat die Masseebene unter der Rückverdrahtung. Die damit höhere kapazitive Belastung erhöht die Laufzeit bei geringerem Rauschen.

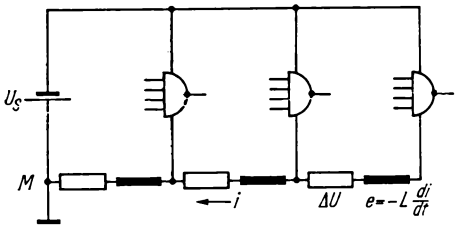


Bild 4.34. Galvanische Kopplung

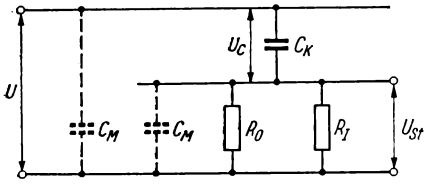


Bild 4.35. Kapazitive Kopplung

Die Anordnung stellt ein Differenzierglied mit Verzögerung 1. Ordnung dar (Bild 4.35).
Ohne Masseplatte gilt

$$u = u_C + u_{St}$$

$$\text{mit } i = C_K \frac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t} \text{ und } u_{St} = i\,(R_O \parallel R_I) = i\,R$$

$$\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t} + \frac{\mathrm{d}u_{St}}{\mathrm{d}t};\quad \frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} = \frac{u_{St}}{RC_K} + \frac{\mathrm{d}u_{St}}{\mathrm{d}t};$$

$$T\frac{\mathrm{d}u_{St}}{\mathrm{d}t} + u_{St} = T\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t};\quad \frac{u_{St}}{u} = \frac{p\,T}{1+p\,T} \text{ mit } T = RC_K. \tag{4.1}$$

Mit Masseplatte wirkt C_M, und es wird

$$\frac{u_{St}}{u} = \frac{1}{1+\dfrac{C_M}{C_K}} \cdot \frac{p\,T}{1+p\,T} \tag{4.2}$$

mit $T = R\,(C_K + C_M)$.
Mit H-Potential (log. L) beaufschlagte Leitungen (Bild 4.36) werden durch kapazitive Einkopplung bei der L/H-Flanke im Niveau unkritisch angehoben

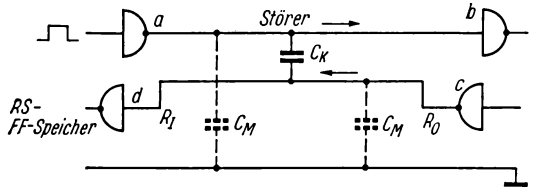


Bild 4.36
Meßanordnung (gegensinnige Laufrichtung)

(Bild 4.37). An der Rückflanke tritt eine Einsenkung auf, die nicht stört, wenn C_K noch nicht wieder entladen wurde bzw. $U_H > 2{,}4$ V ist. Aus der nichtlinearen Kennlinie der IC (Bild 4.7) ergibt sich für $U_{OH} > 4$ V ein hoher Ausgangswiderstand R_{OH} und eine große Zeitkonstante $T = R_{OH} \cdot C_K$. Diese verhindert ein Entladen innerhalb einer Störung mit positiver Überlagerung, so daß die folgende schmale (T ist wegen $R_{OH} \approx 70 \cdots 140\ \Omega$ kleiner) Spitze nicht in den verbotenen Bereich gelangt.

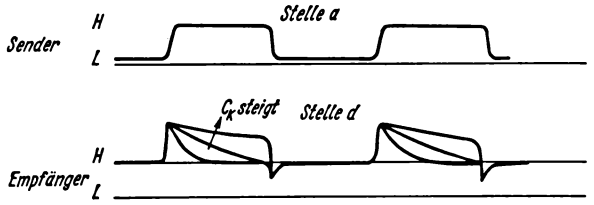


Bild 4.37. Kapazitives Übersprechen auf L-Signal (gegensinnige Laufrichtung nach Bild 4.36)

Führt die gestörte Leitung L-Potential, wird das Signal zur Schaltschwelle (Bild 4.38) verschoben, Schwingungen beim H/L-Übergang sind unkritisch [4.2] [4.26]. Die negativen Überhöhungen können jedoch zu Überlastungen führen [4.17].

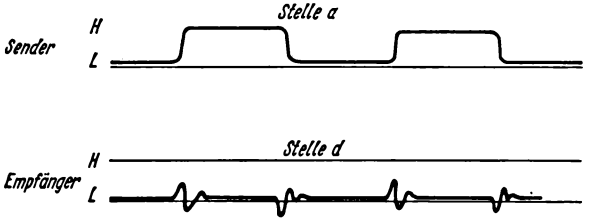


Bild 4.38. Kapazitives Übersprechen auf 0-Signal (gegensinnige Laufrichtung)

Unbeschaltete Eingangsleitungen werden gestört, da der niederohmige R_O des treibenden Gatters fehlt. Sende- und empfangsseitige Belastung sowie Frequenzerhöhung senken das kapazitive Übersprechen, ein Masseschirm beseitigt es nahezu.

Auf Kartenbaugruppen ist (Abstand = Breite) $C_K \approx 63$ pF/m unkritisch.

Rückverdrahtung mit Runddrähten ($l \gg a, r$) [4.21]:

$$C = \frac{\pi \varepsilon l}{\ln\left(\frac{a}{2r} + \sqrt{\left(\frac{a}{2r}\right)^2 - 1}\right)} \approx \frac{\pi \varepsilon l}{\ln \frac{a}{r}} \Rightarrow \approx 60\ \text{pF/m};$$

$2r$ Drahtdurchmesser, a Abstand der Drähte.

Das induktive Übersprechen verursacht den Hauptanteil der Störspannung.

$$u_{ST} = -w_2 \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} \text{ mit } \Phi = k \frac{i_1 w_1}{R_m},$$

$$u_{st} = -k \frac{w_1 w_2}{R_m} \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} = -M \frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} \approx \frac{i_0}{t_a} M. \tag{4.3}$$

$M = k \sqrt{L_1 L_2}$ ($M \approx 0{,}00705$ µH/cm ohne, 0,004602 µH/cm mit Masseplatte).

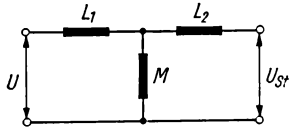


Bild 4.39. Induktive Kopplung

Der Strom nimmt mit $T = R C_M$ ab (C_M s. Bild 4.36), wodurch Gl. (4.3) zu scharf ist.

Induktivitäten auf Kartengruppen liegen bei 1 µH, induktive Koppelfaktoren bei 50 %.

Für die Rückverdrahtung gilt

$$L = \frac{\mu}{\pi} l \left[\frac{a}{\sqrt{r_1 r_2}} + \frac{1}{4}\right]. \tag{4.4}$$

Näheres s. [4.21].

Der Abstand der Signal- und besonders der *R*-, *S*- und Taktleitungen zum Massepotential ist möglichst gering (< 5 mm) und damit der umfaßte Fluß klein zu halten [4.28]. Durch Verdrillen der Taktleitung mit Massepotential tritt mit der gewollten Senkung der Störempfindlichkeit eine große Taktverformung durch Reflexion ein. Mit den Lasteinheiten steigt der mit dem Strom verknüpfte hohe induktive Anteil der Störspannung. Ansteuernde Leistungsgatter sind deshalb unmittelbar beim Verbraucher vorzusehen.

Zur phasenrichtigen Überlagerung kapazitiver und induktiver Störungen gilt, daß sie sich bei gleichsinniger Informationslaufrichtung teilweise gegenseitig aufheben, bei gegensinniger überlagern.

Kapazitive Spannungen verändern den Pegel auf der gesamten Leitung gleichermaßen (Querspannung), induktive haben als Längsspannungen Dreieckscharakter (Eingangs- und Ausgangswiderstand sind in Reihe geschaltet).

Bei gleichsinniger Laufrichtung wird die kapazitive Einkopplung am niederohmigen Ausgang R_O sofort entladen. Bei gegensinniger Signallaufrichtung kann die Entladung am Punkt *d* (Bild 4.36) anfangs nur über den hochohmigen dynamischen Eingangswiderstand (> 1 kΩ) beginnen, die erst am niederohmigen Ausgang R_O (Punkt *c*) nach der Laufzeit t_v größer wird. Nach $2\,t_v$ wird die Störung durch Reflexion abgebaut.

Führt die gestörte Leitung log. 0-Signal (≙ L-Pegel), ist sie noch niederohmiger als bei log. L abgeschlossen, wodurch die Möglichkeit kapazitiver Störungen sinkt, jedoch die an den Strom geketteten größeren induktiven Störungen zunehmen (log. L ist störsicherer). Ohne geeignete Gegenmaßnahmen (Masse) sind die Störspannungen auf log. 0 zu groß. Auch das alleinige Vergrößern des Abstands bringt keine genügenden Ergebnisse.

Besondere Beachtung verdienen die JK-FF-Ausgänge, da diesei m Gatter auf den Eingang zurückgeführt sind (Bild 4.14).

Aus der Verdrahtungsebene herausführende Leitungen werden daher durch ein NAND-Glied entkoppelt, ihre Legung erfolgt bis 3 m Länge mit 40adriger Bandleitung (BY 40 × 0,3), wobei die Informationsleitungen zwischen Masseadern eingelagert sind. Die Masseleitungen sind beiderseitig untereinander und mit der Masseplatte zu verbinden. Dadurch wirken sie als Kurzschlußwicklung und verringern die Gegeninduktivität und mit dieser die Störspannung. Die erhöhte Signallaufzeit ist wegen statischer Abfrage unkritisch.

Bei nichtsystemeigenen Signalen werden die Impulsflanken mit Hilfe eines R-C-Glieds auf 1 µs Anstiegszeit abgeflacht und somit gefahrlos verarbeitet [4.28].

4.4. Konstruktive und technologische Festlegungen [4.13]

Unter Kartenbaugruppe (KBG) (TGL 25016) werden mit Bauelementen oder Bausteinen bestückte Leiterplatten (Bild 4.40) verstanden, die eine konstruktive, aber nicht notwendig funktionelle Einheit bilden. Kunstruktive und funktionelle Übereinstimmung bringt im Prüfprozeß und bei der Projektierung erhebliche Vorteile.

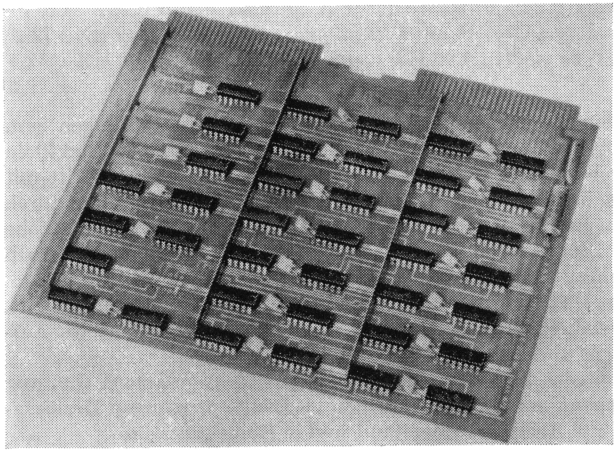


Bild 4.40. Kartenbaugruppe
Werkfoto VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt

Unter Baustein sei eine nicht zerstörungsfrei trennbare Einheit aus diskreten oder integrierten Bauelementen verstanden.

Die Zweiebenenleiterplatten (TGL 25016) sind mit Kupferkaschierung (Dicke 35 + 10/ — 5 µm) versehen (Bild 4.41), wobei Verbindungen zwischen Bestükkungs- und Lötseite durch metallisierte Löcher erfolgen. Als Trägermaterial wird mit Glasfasern verpreßtes Epoxid, Cevausit Cu 0,7, Typ S 2 C – 1,5 ($\varepsilon_r = 4{,}6$) nach TGL 11651 verwendet.

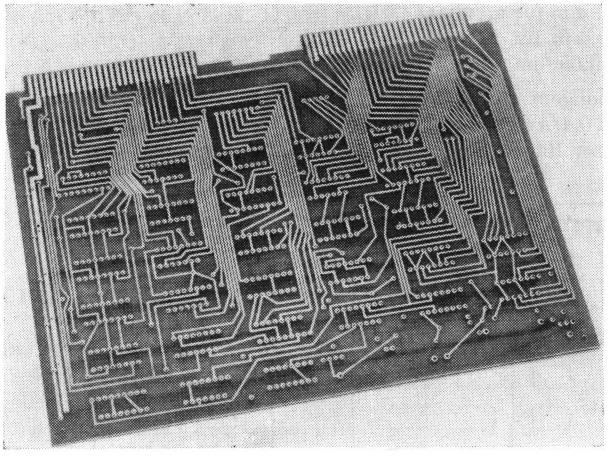


Bild 4.41. Leiterplatte, Lötseite
Werkfoto VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt

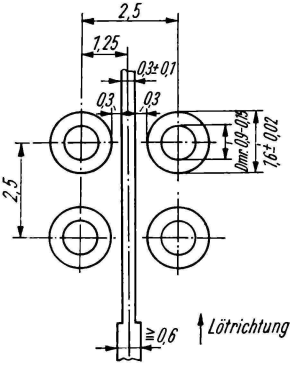


Bild 4.42. Leiterzugdurchführung

Vielschichtige Leiterplatten werden bei NC noch nicht angewendet.

Durchführungen zwischen zwei Lötaugen (Sekundärraster 1,25 mm) (Bild 4.42) senken den Platzbedarf und die Leitungslängen, mithin die Verzögerung und die Störspannung. Sie sind aber technologisch ungünstig und möglichst zu vermeiden (Schwierigkeitsgrad IV nach TGL 25016). Die zulässige Kriechstrecke (TGL 16559) zwischen Lötauge und Leiterzug beträgt $\geqq$ 0,2 mm.

Die Metallisierung des Loches ist gut, wenn $\geqq$ 75% des Lochmantels mit einer Schichtdicke $\geqq$ 15 µm verkupfert sind. Kontrollbohrungen außerhalb der Nutzfläche erleichtern dazu die Aussage.

Aus der Vielzahl der möglichen Abmessungen für KBG nach TGL 25016 wurden für das NC-System folgende Vorzugsgrößen (Bild 4.43) ausgewählt:

$h \times l = 215$ mm $\times$ 170 mm für maximal 42 IC,
95 mm $\times$ 170 mm für 14 bzw. 20 IC
(zulässige Bauhöhe im 15-mm-Raster $\leqq$ 8,5 mm)

mit $2\times$ bzw. $1\times$58poligem direktem Steckeranschluß. Die Pole werden galvanisch mit Au 0,2/Pd 0,4/Au 0,2 vergoldet und lassen etwa 500 Steckungen zu.

Der Bedeckungsfaktor Bauelementefläche zu Bestückungsfläche beträgt 0,27.

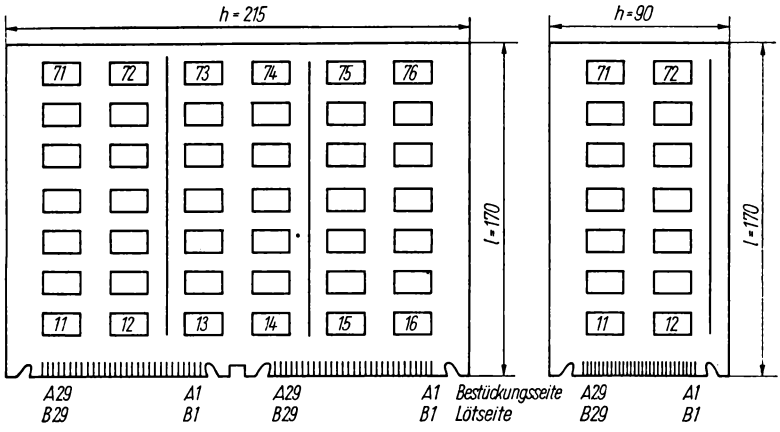


Bild 4.43. Bestückungsplätze

Für diskrete Technik brachte die Beschränkung auf Grundfunktionen je Kartengruppe (KBG) Vorteile, da ohnehin keine kompletten Funktionseinheiten unterzubringen waren. Die Gesamtzahl der KBG bei diskreter Bestückung kann auch durch Sonderausführungen nicht verringert werden, da der Platz immer voll genutzt wird. Bei integrierter Technik und Bestückung mit unverknüpften Grundgattern setzen die Anschlußstellen der IC-Anzahl bald eine Grenze. Einen Ausweg schafft die Installation einer kompletten Funktionsgruppe je Kartenbaugruppe, wodurch die Notwendigkeit größerer Leiterplatten gegeben ist [4.30] bis [4.33]. Sinnvoll ist die Auslegung nach der Maximalfunktion und Abrüstung in Bestückungsvarianten [4.33] [4.34]. Damit ist jedoch die mehrfache Verwendung eines KBG-Typs innerhalb der Steuerung selten möglich, die Typenzahl steigt. Bei einfach integrierten Bauelementen steigt die Zahl der Elementarschaltungen bezogen auf den Flächeninhalt gegenüber diskreter Technik auf das 5- bis 10fache, das Volumen auf das 6fache [4.34].

Die Funktionseinheiten-Steckkarten liegen nach *Lobigkeit* [4.30] ökonomisch wesentlich günstiger (50%) als solche mit Grundfunktionen. Der Hauptvorteil liegt aber im Service, der Übersichtlichkeit, der kurzen Leitungsführung und erhöhten Zuverlässigkeit.

Die klimatische Beanspruchung ist in der Klimaprüfklasse nach TGL 9200/02 ausgedrückt und enthält Transport- und Lagerungsklassen. Prüfungen der KBG auf Schwingungen und Stoß sind in TGL 200-0057/02 und /06 festgelegt, Resonanzstellen liegen zwischen 50 und 150 Hz, maximal bei 500 Hz [4.35].

Ein Überschreiten der zulässigen Lagerungsdauer der Bauelemente ergibt eine starke Verschlechterung der Lötbarkeit [4.36].

5. INNERE DATENVERARBEITUNG IN FESTVERDRAHTETEN STEUERUNGEN

5.1. Blockschaltbilder von numerischen Anzeigen und Steuerungen

5.1.1. Allgemeines

Die unterschiedlichsten Anwendungsfälle stellen so mannigfaltige Anforderungen an die NC, daß die Gestaltung eines funktionellen Baukastens unumgänglich wird. Solche Baukästen sind u.a. NC 400 der DDR [5.1], N-Reihe der UdSSR, NS-Reihe der ČSSR [5.2], Reihe 7500 von General Electric [5.3], Sinumerik 500-Reihe [5.4], NC 400 von AEG [5.5], H- und T-Reihe von Bendix [5.6], MTC-Reihe von Saab Electronic [5.7].

Allen diesen Baukästen ist eigen, daß sie aus funktionell vergleichbaren Baugruppen, kombinationsfähig zur Gesamtfunktion, zusammengesetzt sind. Die technische Realisierung ergibt die verschiedenartigsten Möglichkeiten[1]). Im Buch wird keine Rücksicht auf die ausgeführten Kartenbaugruppentypen genommen, und teilweise wird auf Verriegelungen verzichtet, nicht gezeichnete Eingänge sind an U_S liegend zu betrachten. Die Numerierung bei Schaltkreisen mit mehreren gleichen Gattern wird vom Gatter mit den niedrigsten Zahlen abgeleitet. Anschlußzahlen stehen nach dem Schrägstrich, zum Beispiel *G 1/3*: Gatter *1*, Anschluß *3*. Angaben, wie „rückwärts ≙ L'', bedeuten stets auch Verneinung des Gegenteils, d.h., „vorwärts ≙ 0". $\bar{x}_1$, $\overline{\text{Nullen}}$, bedeuten „kein x_1 ≙ L"; „keine Nullen ≙ L".

Im folgenden werden im Gegensatz zu Abschnitt 4. keine Pegel (H, L), sondern logische Signale (L, 0) verwendet. Zum Teil gestattet der technische Fortschritt heute und in den nächsten Jahren die Bereitstellung höher integrierter Schaltkreise, wodurch jedoch keine prinzipielle Änderung eintritt. Die Standardschaltungen, wie Schieberegister, Zähler, Addierwerk, werden am Anwendungsfall abgehandelt und sind im Sachregister leicht aufzufinden.

5.1.2. Numerische Positionsanzeigen

Numerische Positionsanzeigen sind vorwiegend für eine Achse ausgelegt (Bild 5.1) und mit interner Stromversorgung (Bilder 5.2, 5.3 rechts), z.T. aber auch mit externem Netzteil vorgesehen.

Neben der Funktionsübersicht sind noch folgende Daten gegeben:

- Schutzklasse nach TGL 21366 I (Isolierung und Schutzleiteranschluß)

[1]) Die Darstellung in diesem Buch stützt sich weitgehend auf die Baugruppen NC 400 aus dem Lieferprogramm des VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt.

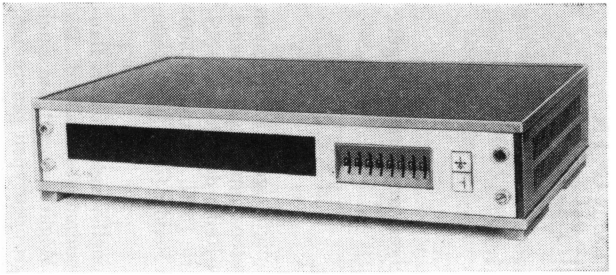


Bild 5.1. Positionsanzeige NC 410
Werkfoto VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt

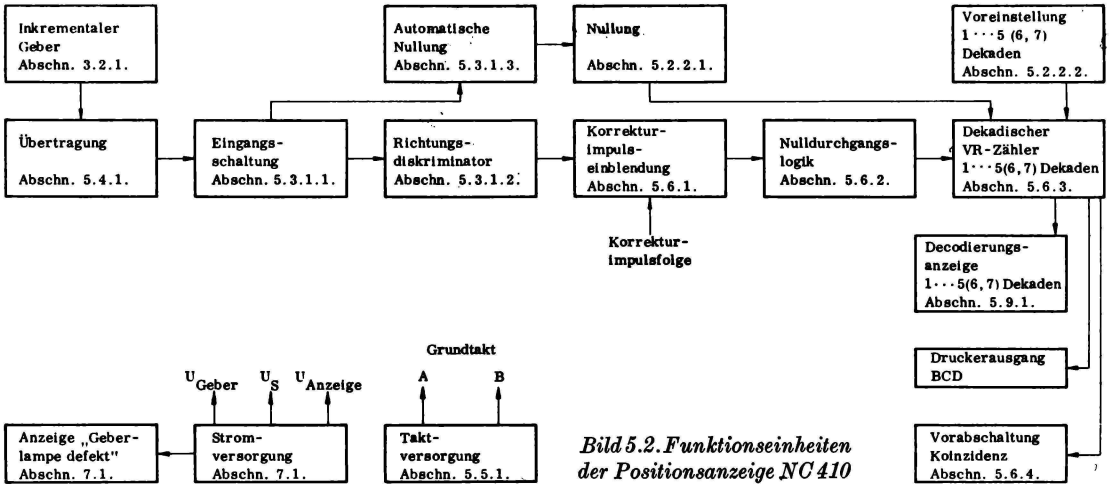


Bild 5.2. Funktionseinheiten der Positionsanzeige NC 410

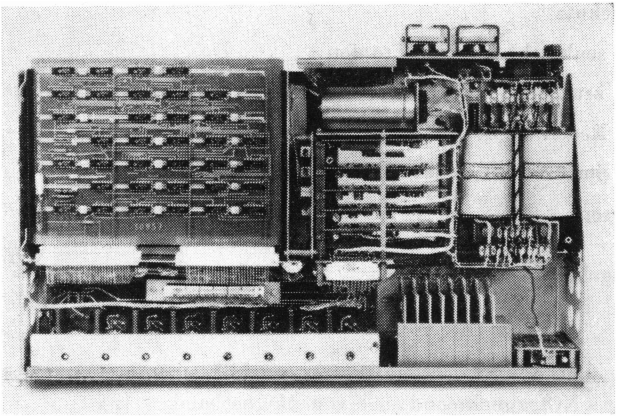


Bild 5.3. Positionsanzeige NC 410 (offen)
Werkfoto VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt

– Einsatzklasse nach TGL 9200/02

+5/+40/+15/80/1 0 0 1

min. Temperatur (°C)
max. Temperatur (°C)
max. Dampfdruck (Torr)
max. rel. Luftfeuchtigkeit (%)
Staubeinwirkung (1)
keine direkten Witterungseinflüsse (0)
leichte Luftverunreinigung, keine löslichen Stäube (0)
leichten Schwingungen und Stößen ausgesetzt (1), normaler Transport

– Schutzgrad nach TGL 15165/01

IP 43/IP 40 für Bedienseite

Berührungs- und Fremdkörperschutz 0 bis 6,
z. B. 4 keine Berührung mit Werkzeug
Schutz gegen Fremdkörper ≧ 1 mm
5 völliger Berührungsschutz, keine schädliche Staubablagerung
Wasserschutz 0 bis 8,

z.B. 0 ohne Wasserschutz

1 Schutz gegen senkrecht fallende Tropfen

2 Schutz gegen senkrecht fallende Tropfen bei 15° Neigung des Prüflings

3 Schutz gegen Regen bis 60°

4 Schutz gegen Spritzwasser, beliebige Richtung

– stapelbar bis 4 Achsen.

5.1.3. Sollwerteingabe

Sollwerte gelangen
- von Hand
- vom Lochstreifen (englisch off-line, nebenher, nicht eingegliedert, betreffend Kopplung Rechner – NC), zunehmend auch vom Magnetband
- direkt (englisch on-line, mitlaufend, eingegliedert) vom übergeordneten Rechner

in die Steuerung (Bild 5.4).

Neben den von Hand auszulösenden Start-Stopp-Funktionen verzichtet man weder auf manuelle Korrekturen noch auf die Möglichkeit der Handeingabe. Korrekturen ergeben sich zwangsläufig durch den technologischen Arbeitsablauf (Spannen, Werkzeugverschleiß u.a.), Handeingaben sind ein Zugeständnis an noch unvollständiges Beherrschen des technologischen Prozesses, der Organisation oder des Datentransports zum und vom Programmierzentrum.

Die benötigte Informationsmenge bei Punkt- und Streckensteuerungen übersteigt normalerweise kaum 10 Byte/s [5.8], nur bei sehr schnellen Operationsfolgen (z.B. bei Leiterplattenbohrmaschinen) liegt die Informationsdichte höher. Steuerungen ohne Eingabezwischenspeicher müssen eine so hohe Eingabefrequenz ($\geqq$ 50 Byte/s) erhalten, daß die Unterbrechung der Bearbeitung beim Einlesen eines Satzes zu keinem unerwünschten Freischneiden führt.

Dagegen fordern Bahnsteuerungen eine Datenrate von 150 bis 400 Byte/s, je nach Vorschubgeschwindigkeit und Interpolationsverfahren bei Kreisinterpolation [5.8] bis [5.10].

Da der Lochstreifenleser das wartungsintensivste Glied der Datenkette darstellt, ist man bemüht, durch erhöhten Einsatz von Speichertechnik (zur Aufnahme des gesamten Werkstückprogramms) dessen Wirkdauer zu minimieren bzw. durch transportable Speicher oder DNC ganz auszuschalten.

5.1.4. Punkt-Strecken-Steuerungen

Punkt-Strecken-Steuerungen (Bild 5.5) weisen besonders für den Einsatz an Bohr- und Fräswerken eine große Anzahl Korrektur- und Unterprogrammeinrichtungen auf. Beim Typ NC 470 (Bild 5.6) verläuft der Rechenalgorithmus seriell im BCD modulo 16 nach Abschn. 2.4.5.3. Neben der Funktionsübersicht sind noch folgende Daten gegeben (Erläuterungen s. Abschn. 5.1.2.):

– Schutzklasse nach TGL 21366	I
– Einsatzklasse nach TGL 9200/02	+5/+40/+15/+80/1001
– Schutzgrad nach TGL 15165/01	IP 43/IP 40 für Bedienseite

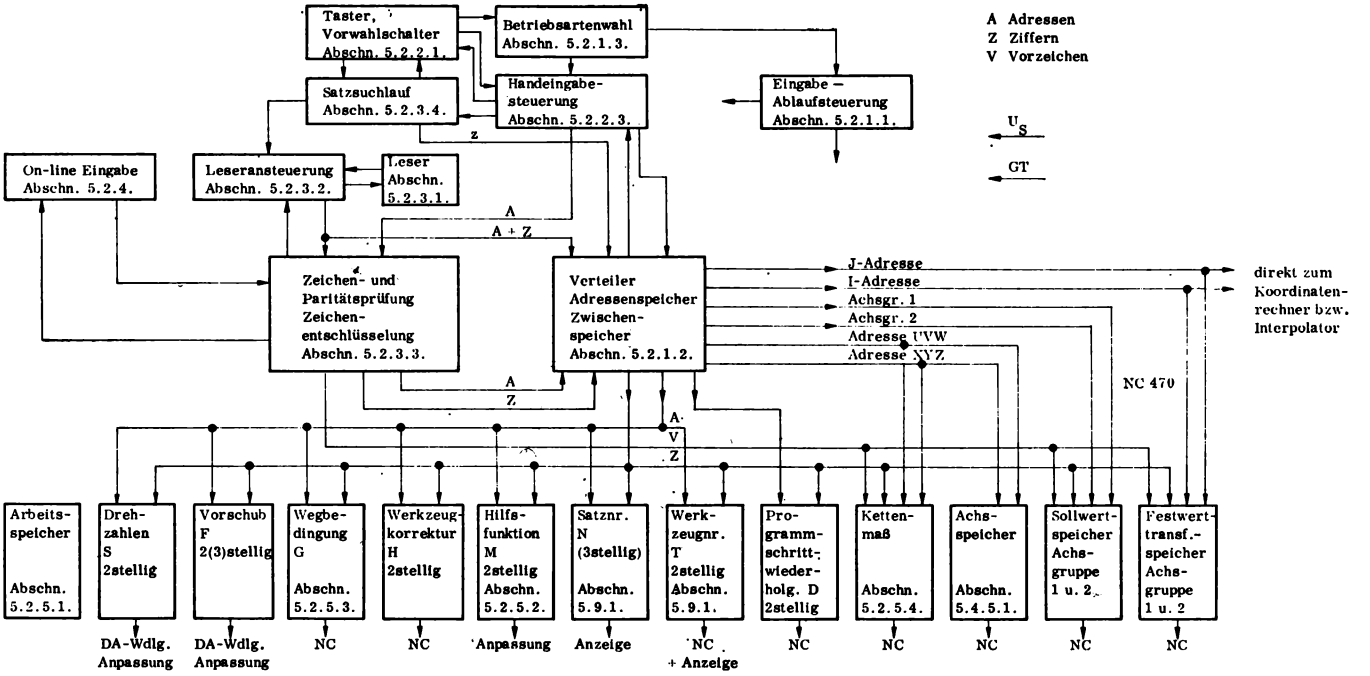


Bild 5.4. Funktionseinheiten der Programmeingabe und -speicherung NC 450 und NC 470

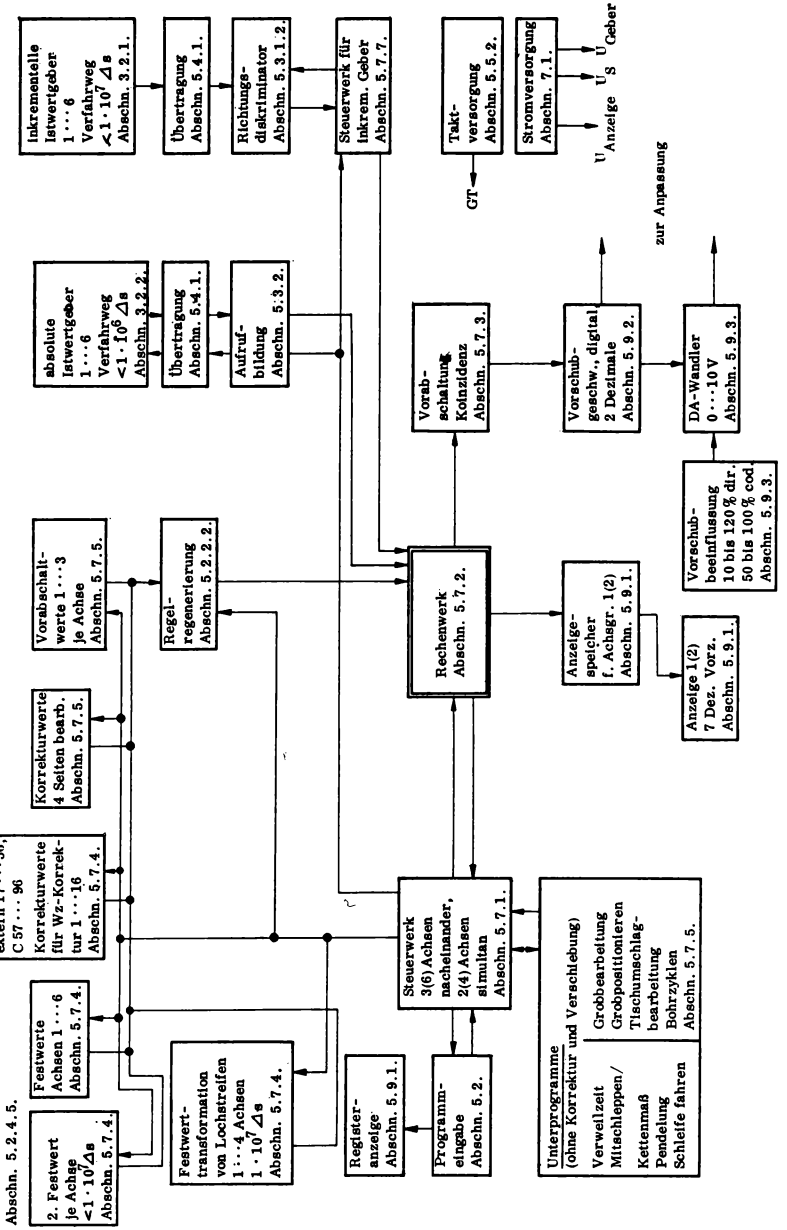


Bild 5.5. Funktionseinheiten der Punkt-Strecken-Steuerung NC 470

- Netzspannung Ws 220 V +10/—15%, 50 Hz ± 2%/± 1% bei fotoelektrischem Leser; 380/220 V für Lüfter
- Anzahl der steuerbaren Achsen 3 (6), davon 2 gleichzeitig
- programmierbare Weglänge $1 \cdot 10^7 \, \Delta s$
- Eilganggeschwindigkeit 20 m/min bei $\Delta s = 0{,}01$ mm
- direkte Vorschubprogrammierung, 3 Dekaden, analoge Ausgabe
- geometrisch gestufte Vorschubprogrammierung (R 20), digitale Ausgabe
- 3 Vorabschaltwerte je Achse
- 1 Koinzidenzfälschung je Achse.

Neben den umfassenden Systemen sind billige Einzwecksteuerungen im Angebot, die nur in wenigen ausgewählten Varianten lieferbar sind. Einen solchen Typ stellt die vorwiegend für Belange des Drehmaschinenbaus entwickelte NC 430 (Bilder 5.7, 5.8) mit Schrittantrieb bzw. NC 431 mit Gs-Stellantrieb dar. Letz-

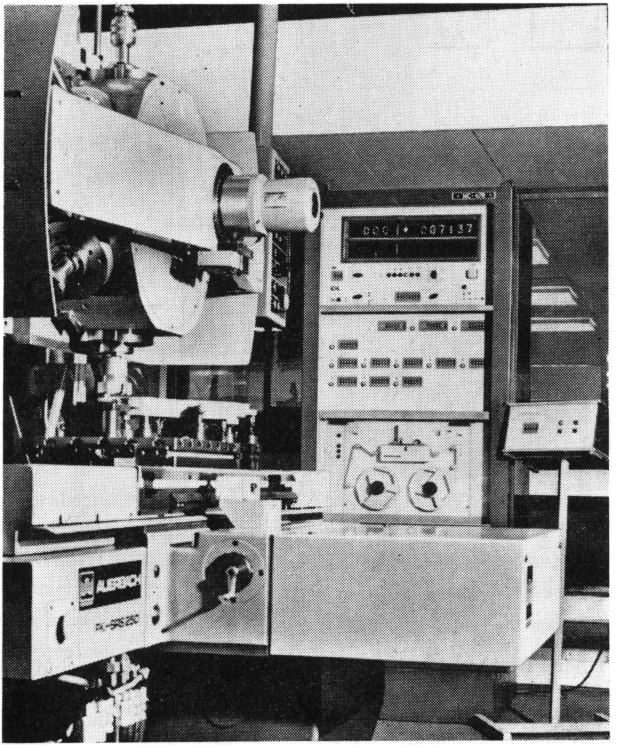


Bild 5.6. Punkt-Strecken-Steuerung NC 470 an der Werkzeugmaschine FKrSRS 250

Werkfoto VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt

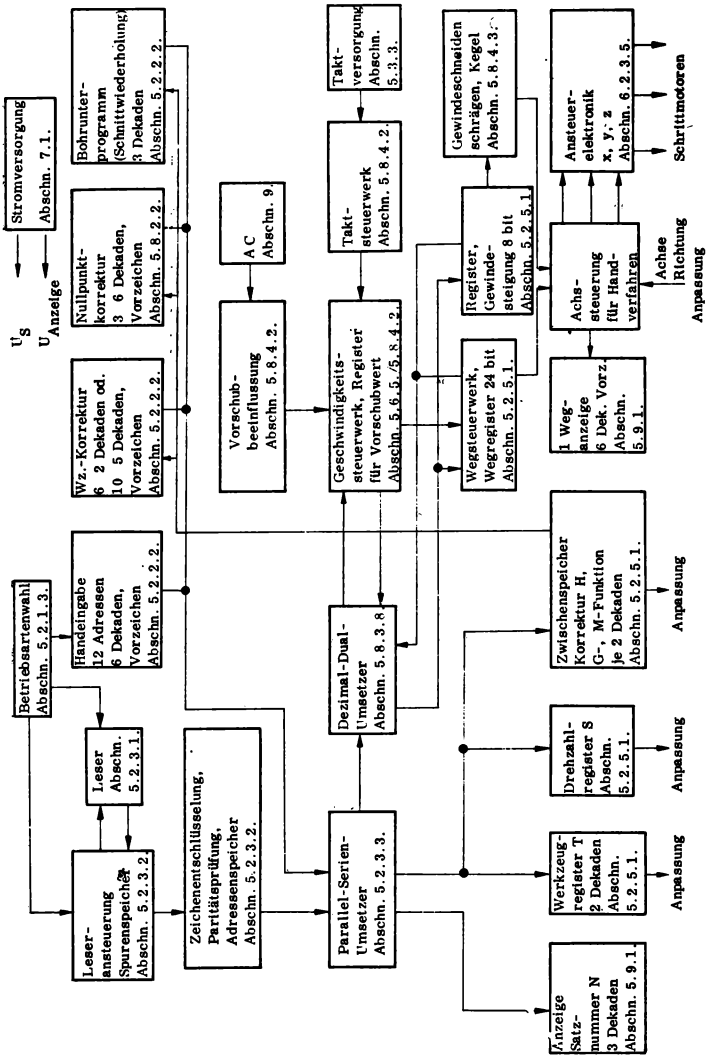


Bild 5.7. Funktionseinheiten der Punkt-Strecken-Steuerung NC 430

terer verfügt über einen Linear-Zirkular-Interpolator. Korrekturen sind in serieller Arbeitsweise über das Verfahren der Achsen möglich.

Für die Kettenmaßsteuerung NC 430 gelten folgende Daten, die aus Bild 5.7 nicht hervorgehen (Erläuterung s. Abschn. 5.1.2.):

- Schutzklasse nach TGL 21366 I
- Einsatzklasse nach TGL 9200/02 +5/+40/+15/80/1001
- Schutzgrad nach TGL 12165/01 IP 43/IP 40 für Bedienseite

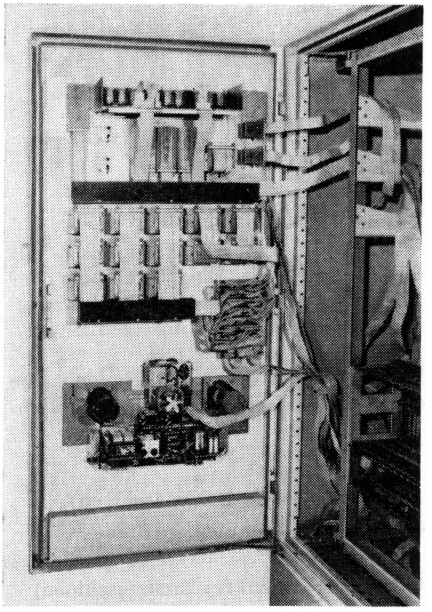


Bild 5.8. Punkt-Strecken-Steuerung NC 430, geöffnet
Werkfoto VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt

– Netzspannung	Ws 220 V + 10/— 15%, 50 Hz ± 2%/± 1% bei fotoelektrischem Leser 380/220 V für Lüfter
– Anzahl der steuerbaren Achsen	3, davon 2 Achsen gleichzeitig
– programmierbare Weglänge	$1 \cdot 10^6 \, \Delta s$
– kleinster programmierbarer Weg Δs	0,01 mm
– Eilganggeschwindigkeit	4,8 m/min bei 0,01 mm Auflösung (= 8000 Inkremente/s)
– Vorabschaltwert	1
– direkte Vorschubprogrammierung in Stufen von	0,01 mm/min
– Vorschub	0 bis 2000 Inkremente/s
– Vorschubbeeinflussung	nur für Eilgang
– Wegeanzeige mit automatischer Achsumschaltung	
– Gewindeschneiden (mm/Umdrehung) mit IGR 1000 mit Nullimpuls	
0,5 ··· 2,0	Stufensprung 0,25
2,5 ··· 6,0	Stufensprung 0,5
7,0 ··· 10,0	Stufensprung 1,0
10,0 ··· 20,0	Stufensprung 2,0

– zulässiger Steigungsfehler	1 Inkrement
– Schrägen, positive und negative Winkel	15°, 30°, 45°, 60°
– Kegel $(D-d):1$	1:3, 1:5, 1:6, 1:10, 1:12, 1:19, 1:20, 1:50 ± 1 Inkrement

Als vergleichbare Erzeugnisse seien genannt:

UdSSR

- 5achsige Streckensteuerung mit Bildschirmanzeige (Rasmer 2 M)
- 5achsige Punkt-Strecken-Steuerung N 55, davon 3 Achsen gleichzeitig, mit phasenzyklischen Meßsystemen, mit Vorschubregelkreis, Eingabe absolut oder inkremental, digitale (2 Dekaden) oder analoge Drehzahlausgabe S, Werkzeug- und Nullpunktkorrektur; Vorschubbeeinflussung; H, M, G-Adressen 2stellig, T-, F 3stellig.
  Fotoelektrischer Leser 300 Z/s, ISO-Code mit Paritätskontrolle, Handeingabe und Anzeige aller Funktionen, IC-Technik, Befehlsausgabe Relais und Halbleiter.

ČSSR [5.2] [5.11]

– 2achsige Punktsteuerung	NS 315 (inkremental für Bohrmaschinen)
– 4achsige Streckensteuerung	NS 320 (inkremental für mittlere Fräsmaschinen)
– 2achsige Streckensteuerung	NS 340 (zyklisch absolut für Drehmaschinen)
– 6achsige P/S-Steuerung	NS 350 (inkremental für große Fräsmaschinen)
– 6achsige P/S-Steuerung	NS 360 (zyklisch absolut, universell einsetzbar)

5.1.5. Bahnsteuerungen

Die DDR-Bahnsteuerung NC 450 (Bilder 5.9 und 5.10) ist eine $2^1/_2$D-Bahnsteuerung mit digitalem Linear-Kreisinterpolator und verfügt über eine Reihe von Zusatzeinrichtungen.

Obwohl nach [5.9] Schrittweiten Δs von 10^{-4} bis 10^{-1} mm angeboten werden, verlangt die Praxis überwiegend eine kleinste programmierbare Einheit von 10 µm (mit Tendenz nach kleineren Werten), wobei der Rechenschritt in der NC 450 2,5 µm ist. Die maximal verarbeitbare Informationsmenge je Zeiteinheit gestattet wegen der Dynamik der Werkzeugmaschine ohnehin keine höhere Auflösung [5.12]. Auf dem Bahnsteuerungsgebiet werden strukturierte Systeme angeboten, die über alle technischen Möglichkeiten verfügen und für die Simultanarbeit von $\geqq 4$ Achsen ausgelegt sind. Da das Anwendungsgebiet dieser hochleistungsfähigen Erzeugnisse auf extreme Werkstückformen beschränkt ist, wurde in der DDR bewußt auf die gleichzeitige Steuerung von mehr als 2 Achsen verzichtet.

Besonders bei Drehmaschinen erscheint das Angebot von einfachen Typen notwendig, um das Verhältnis Leistung – Preis günstig zu gestalten [5.13].

Für die NC 450 sind folgende Daten gegeben, die aus Bild 5.10 nicht hervorgehen (Erläuterung s. Abschn. 5.1.2.):

– Schutzklasse nach TGL 21366	I
– Einsatzklasse nach TGL 6200/02	+5/+40/+15/80/1001

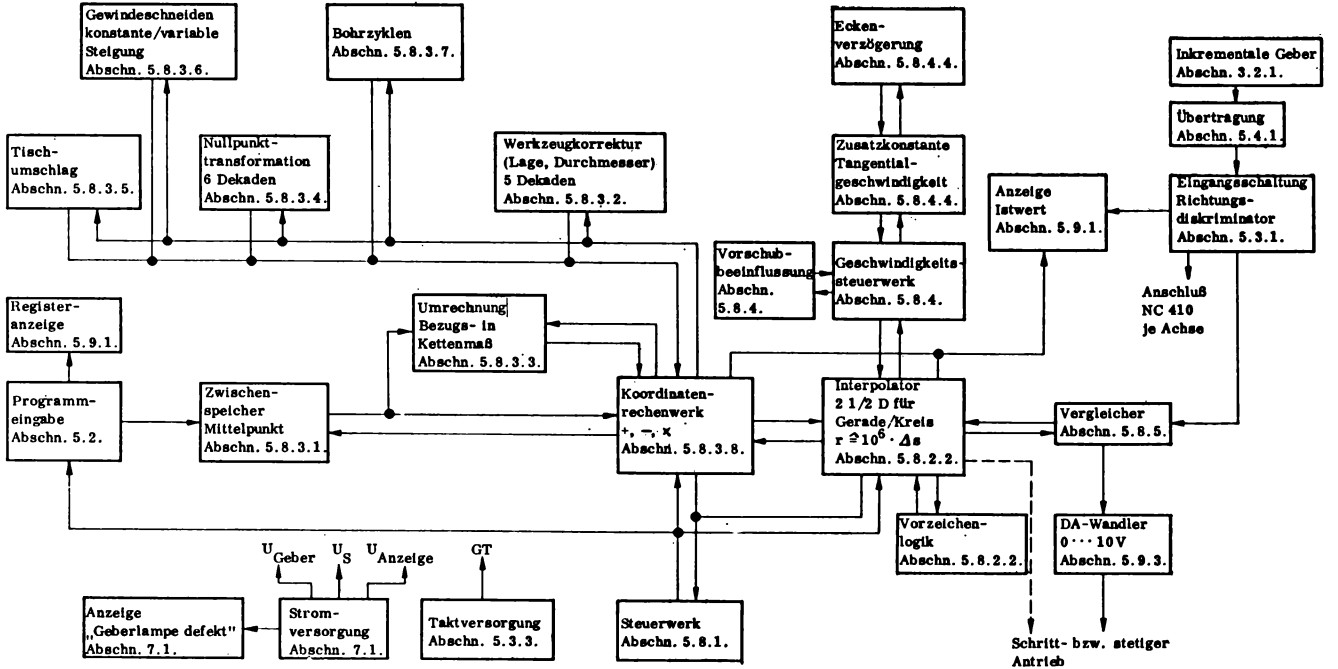


Bild 5.9. Funktionseinheiten der Bahnsteuerung NC 450

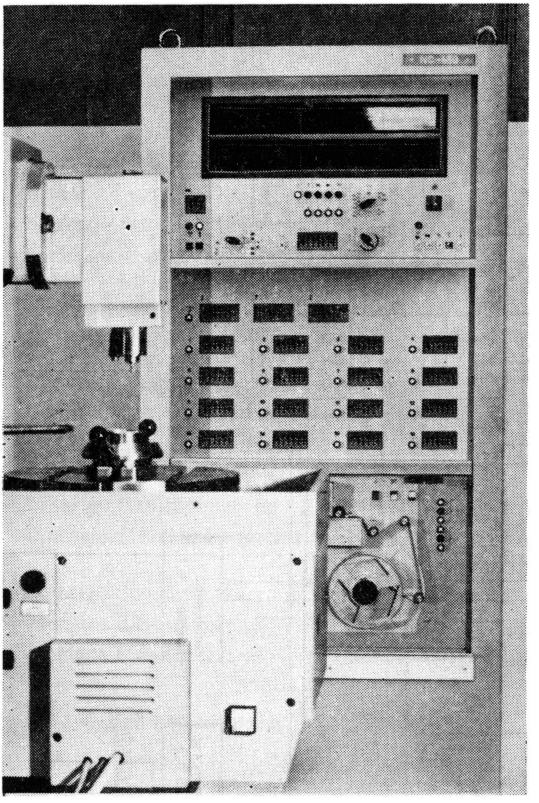


Bild 5.10. Bahnsteuerung NC 450 an der Werkzeugmaschine FUW 250
Werkfoto VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt

– Schutzgrad nach TGL 15165/01	IP 43/IP 40 für Bedienseite
– Netzspannung	Ws 220 V +10/— 15%, 50 Hz ± 1% 380/220 V für Lüfter
– Anzahl der steuerbaren Achsen kombinierbar XY, XZ, UW, XV, XW, CY, CZ, BY, BZ, YZ, YW	5, davon 2 gleichzeitig
– programmierbare Weglänge	$1 \cdot 10^6 \, \Delta s$;
– kleinster Kreisradius	$4 \, \Delta s$
– minimale Vorschubgeschwindigkeit	0,16 mm/min bei $\Delta s = 0{,}01$ mm
– maximale Vorschubgeschwindigkeit	5 m/min bei $\Delta s = 0{,}01$ mm
– direkte Vorschubprogrammierung	5 Dekaden, kleinste Einheit 0,1 mm/min oder

- Vorschubprogrammierung geometrisch gestuft R 20, 2stellig
- Vorschubbeeinflussung 10 bis 120% bei direkter Vorschubprogrammierung oder 55 bis 100% bei geometrischer Stufung.

Als vergleichbare Erzeugnisse seien genannt:

UdSSR

- 2achsige Bahnsteuerung N22-1M für Drehmaschinen, mit elektrohydraulischen Schrittantrieben, NC-Grenzfrequenz 10 kHz, Linear- und Zirkularinterpolation, Werkzeuglängen- und -lagekorrektur (9 Gruppen); Eingabe absolut oder inkremental, digitale (2 Dekaden) oder analoge Drehzahlausgabe S; Vorschubbeeinflussung, H, M, G, T-Adressen 2stellig, Vorschub F 3stellig, fotoelektrischer Leser, 300 Z/s, ISO-Code mit Paritätskontrolle, IC-Technik, Anzeige und Handeingabe aller Funktionen, Befehlsausgabe Relais
- 3achsige Bahnsteuerung N33-1M für Fräsmaschinen, davon 2 gleichzeitig, mit elektrohydraulischen Schrittantrieben (NC-Grenzfrequenz 10 kHz), Linear- und Zirkularinterpolation, Werkzeuglage- und -längenkorrektur, Fräserdurchmesserkorrektur (2×9 Gruppen); weiter wie oben
- 3achsige Bahnsteuerung N33-2M für Fräsmaschinen, davon 2 gleichzeitig bei Zirkularinterpolation, 3 gleichzeitig bei Linearinterpolation, mit Vorschubregelkreis, mit phasenzyklischen Meßsystemen, Werkzeuglage- und -längenkorrektur, Fräserdurchmesserkorrektur (2×9 Schaltgruppen); weiter wie oben
- 5achsige Bahnsteuerung N55 als Variante der Punkt-Strecken-Steuerung
- Kontur 2RT – 71 (einfache Ausführung für Drehmaschinen mit Schrittmotoren)

ČSSR [5.2] [5.11]:

- 2D-Bahnsteuerung NS 400 bzw. NS 410 ($2^1/_2$ D), (zyklisch-absolut für Drehmaschinen)
- 6D-Bahnsteuerung NS 450, davon 2 bzw. 3 gleichzeitig (zyklisch-absolut für Fräsmaschinen).

5.2. Funktionseinheiten für Programmeingabe und -speicherung

5.2.1. Ablauffunktionen der Eingabe

5.2.1.1. *Eingabeablaufsteuerung*

Die Eingabeablaufsteuerung bestimmt

- die Art der Eingabe
- die Operationsfolge bei der Dateneingabe, abhängig von der Betriebsart im synchronen Gleichlauf mit dem Steuerwerk.

Der Eingabezustand der NC wird in der Ablauffolge Eingabe – Bearbeiten – Eingabe usw. bei Steuerungen ohne Zwischenspeicherung eingeleitet, wenn alle Bedingungen für die Informationseingabe vorliegen („Externer Abgleich", „M-Ausgabe möglich", „Neuer Satz", „Hauptkoinzidenz", „Interpolationsende", „Werkzeugwechsel beendet" usw.). Mit Zwischenspeicherung wird der folgende neue Satz während der Abarbeitung des vorherigen eingelesen.

Der Automatikbetrieb wird durch das Signal „Eingabeende" ausgelöst, das durch

Nullpunktabgleich
Externer Abgleich
Verweilzeit (G05)
Informationskorrektur

verhindert wird.
Von den Eingabemitteln sind im Bearbeitungszustand nur die Notfunktionen (Not-Stopp, Vorschub-Stopp) dominierend und die Vorschubbeeinflussung wirksam, es sei denn, es erfolgt die Übernahme eines neuen Satzes in die Zwischenspeicher.

Der Start für alle bei den Betriebsarten unterschiedlichen Abläufe kann von Hand sowie durch Automatikbetrieb ausgelöst werden.

Unter „Externer Abgleich" versteht man eine Quittung von außen, deren Fehlen weiteren Ablauf verhindert, z.B. „Revolverkopfstellung erreicht", „Betriebsdruck vorhanden" oder „Werkzeug gewechselt". Der externe Abgleich ist fest verdrahtet in Abhängigkeit vom betroffenen Befehl, er muß also nicht programmiert werden. Daneben enthält die NC zwei programmierbare Verweilfunktionen:

G 04 Verweilzeit, zeitlich festgelegt (z.B. Freischneiden)

G 05 Verweilzeit bis zur Quittung (z.B. für manuelle Arbeitsgänge, wie Messen).

Im gleichen Satz können hierzu Informationen (z.B. Werkzeugnummer) enthalten sein. Die Verweilzeit entsteht vor Abarbeiten des Satzes und wird durch den Taster „Start" aufgehoben.

Eine Schieberegister-Zählkombination (s. Bild 5.12) in der Ablaufsteuerung dient dazu, die Zahl (2 Dekaden) der gewünschten Satzwiederholungen (Aufruf M 49) durch Einschieben zu speichern. Abhängig von der Nebenkoinzidenz ($\triangleq$ „Teilabschnitt erledigt") und vom Registerinhalt $\neq 0$ wird Leserrücklauf bis zum Hauptsatzzeichen gestartet, ein Rückzählimpuls ausgelöst und der Teilabschnitt wiederholt.

Da erfahrungsgemäß das Verständnis in NAND-Technik schlechter ist als in herkömmlicher UND/ODER/Negator-Darstellung, wurde im Bild 5.11 die Schieberegister-Rückwärtszählerkombination des Bildes 5.12 vorerst einmalig in der konventionellen Form angegeben. TTL-Technik verlangt selbstverständlich die Ausführung nach Bild 5.12.

Arbeitsweise Einschreiben

Über 8 Takte erhalten *G1* und über *G7* alle FF Aufruf. L an *G1* schaltet *FF 4* (analog *FF1* bei 8 Stufen!) Q = L. Mit dem nächsten Takt wird diese Ziffer nach *FF5* geschoben und steht als $2^0 \cdot 10^0$ am Ende im *FF8*.

Arbeitsweise Ringschieben

Die Information des Registers wird am Ausgang von *FF8* seriell abgenommen und mit n-Takten (n Registerlänge) auf den Eingang rückgeführt.

Arbeitsweise Rückwärtszählen (parallele Arbeitsweise)

Der Zähleingang (*G40*) ist vorbereitet, wenn der Registerinhalt $\neq 0$. *FF8* kippt nach der Zahlenfolge (s. Abschn. 2.4.1.) bei jedem Zählimpuls $2^1 \cdot 10^0$ nur, wenn

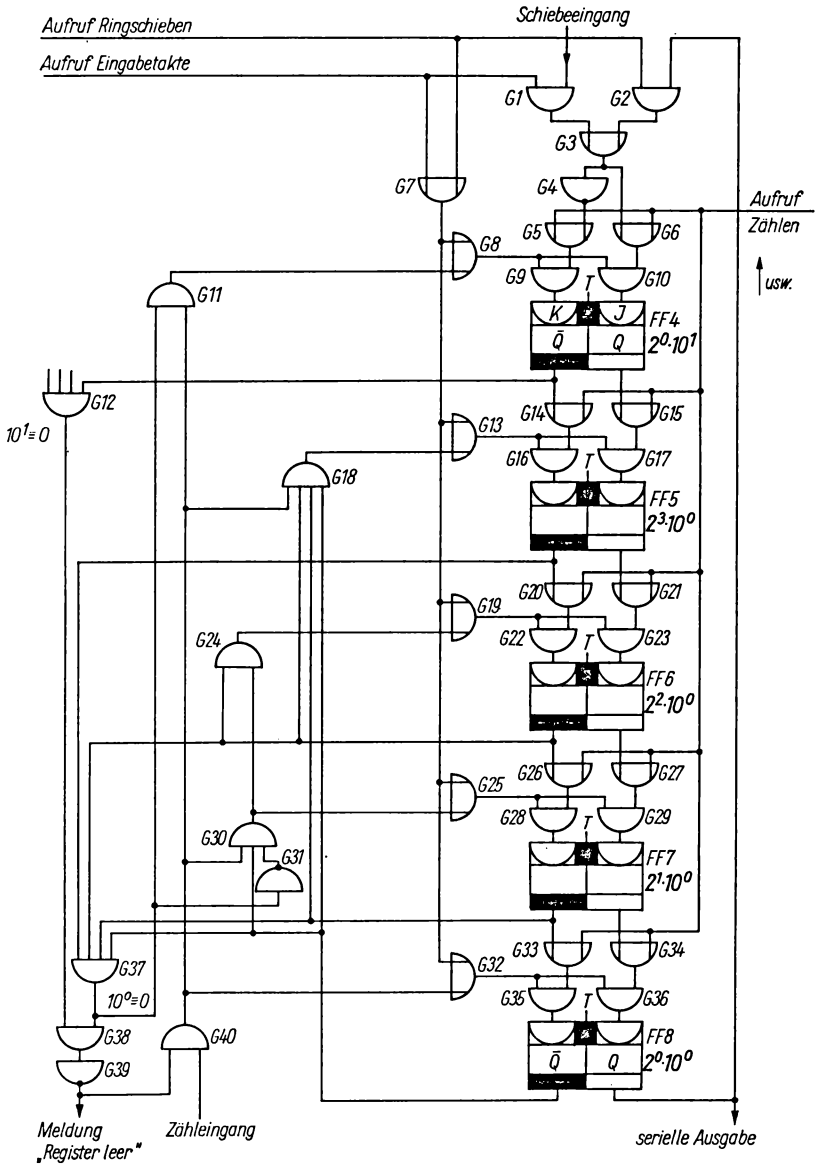
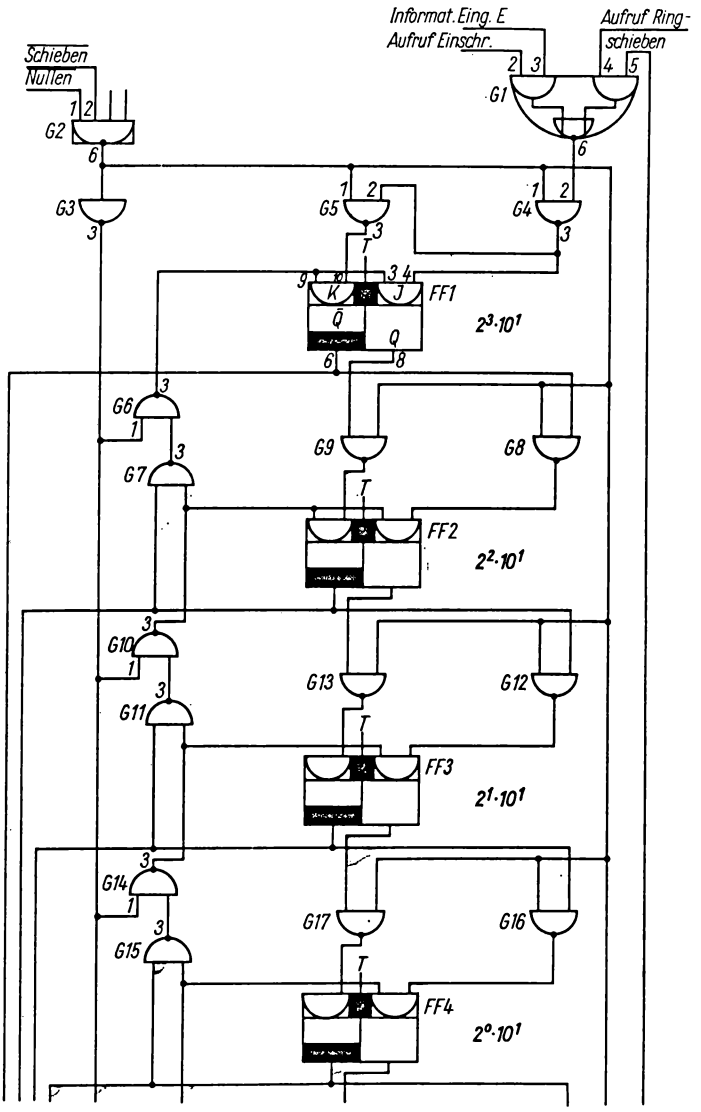


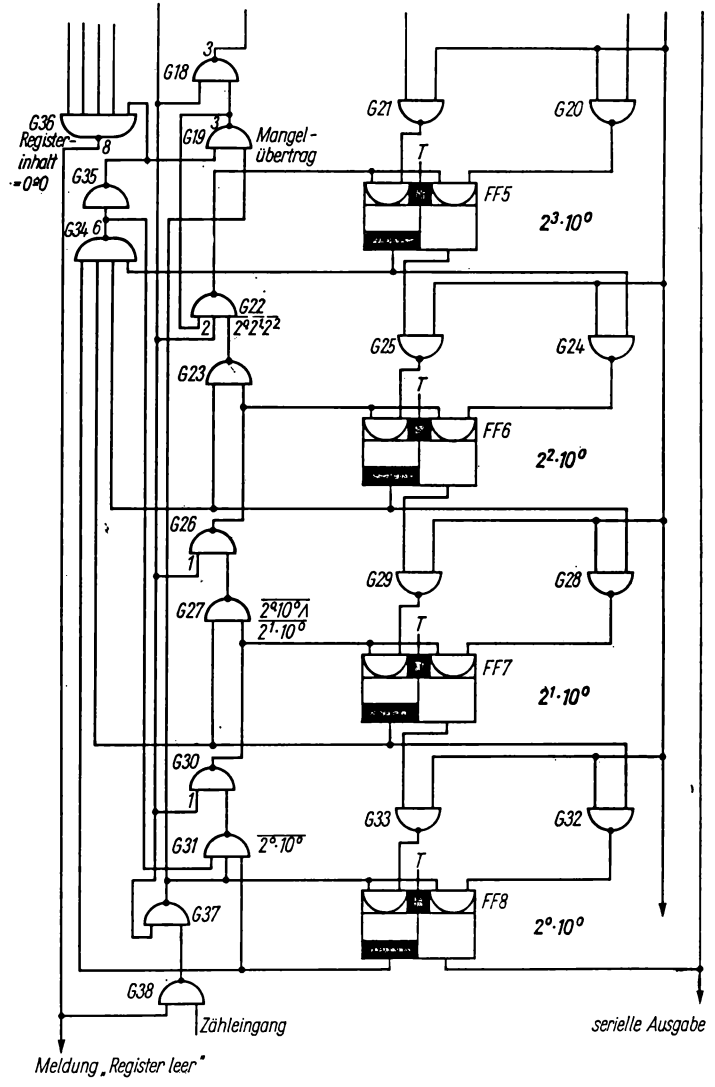
Bild 5.11. Schieberegister-Rückwärtszählerkombination (BCD), konventionelle Darstellung



Fortsetzung s. S. 137

Bild 5.12. Schieberegister-Rückwärtszählerkombination (BCD), NAND-Technik

Bild 5.12, Fortsetzung



im vorigen Schritt $\overline{2^0 \cdot 10^0}$ (*G30*), 2^2 kippt, wenn $\overline{2^0 \cdot 10^0} \wedge \overline{2^1 \cdot 10^0}$ (*G24*), $2^3 \cdot 10^0$ (*FF5*), wenn $\overline{2^0}\,\overline{2^1}\,\overline{2^2}$ (*G18*).

Den Dekadenübergang (z.B. 30 → 29) wertet *G37* aus, indem $10^0 \triangleq 0$ *G30* und *G24* sperrt und den Umschlag nur in $2^0 \cdot 10^0$ (*G40*) und $2^3 \cdot 10^0$ (*G18*), was der „9" entspricht, gestattet. Gleichzeitig löst *G11* einen Mangelübertrag in der Dezimale 10^1 aus.

Völlig analog ist die Arbeitsweise in NAND-Technik nach Bild 5.12.

Arbeitsweise Einschreiben

G2/2 erhält für 8 Takte den Schiebeaufruf, über *G3/3* werden alle FF vorbereitet. Die Eingangsinformation (*G1/3*)

$$E = \mathrm{L} \Rightarrow FF1/8 = \mathrm{L}$$
$$E = 0 \Rightarrow FF1/8 = 0.$$

In 8 Takten werden somit seriell 8 bit eingeschrieben, die bei jedem Takt von FF k nach FF $(k + 1)$ über *G8, G9, G12, G13* usw. geschoben werden. Eventuell vorhandener Inhalt des Registers verschwindet.

Arbeitsweise Ringschieben

Die Information des *FF8* wird über *G1/5* in der Schiebetaktfolge (*G2/2*) in den Eingang rückgeführt, bei gleichzeitiger zerstörungsfreier serieller Entnahme.

Arbeitsweise Rückwärtszählen

G2 ist nicht aufgerufen, und alle Gatter *G6, G10* usw. sind aktiviert. Die FF sind über *G4/3* = L, *G5/3* = L usw. vorbereitet, und es wirkt nur die linke Bildseite. Weiter wie zu Bild 5.11 beschrieben.

5.2.1.2. *Verteiler, Adressenspeicher, Zwischenspeicher*

Der Verteiler ordnet alle numerischen Informationen ihren Speichern zu und bewirkt

- Nullen der Register und Speicher
- Schiebetaktbildung
- Parallel-Serien-Umsetzung.

Das Signal „Alles Nullen" steht 500 ms an (bei Einschalten, Nullungstaster, „Programmanfang"). Dem Verteiler werden vom „Adressenspeicher" die Befehlsadressen und deren Stellenzahl ($n = 2$ bis 4) übermittelt. Die Informationsübernahme bei Hand- und Lesereingabe erfolgt durch einen „Eingabetaktzyklus" (ETZ). Dieser wird mit 32 Takten in der Taktzentrale gebildet und gemäß Stellenzahlaufruf auf $4n$-Takte beschnitten, damit eine mit der Registerlänge des aktivierten Befehls übereinstimmende Schiebetaktfolge entsteht.

Der Start des Eingabetaktzyklus bei Leserbetrieb wird von folgenden Bedingungen abhängig gemacht:

- Start-FF gesetzt
- kein „Paritätsfehler"
- keine Sperrung durch Betriebszeichen (außer „Satzende")
- kein „Hauptsatz" (nur bei ISO)
- keine Sperrung durch „Suchlauf" oder „Leserrücklauf"
- keine „Satzunterdrückung"
- kein „Löschen" (ISO) bzw. „Irrung" (EIA).

Im „Suchlauf rückwärts" erfolgt für die Satzadresse N eine solche logische Verknüpfung, daß nur sie eingespeichert wird.

Die Ziffern der Tetraden stehen im Codezeichen parallel an und werden im „Parallel-Serien-Umsetzer" (PSU) (Bild 5.13) umgesetzt. Das Schieberegister arbeitet bis $f = 10$ MHz, wenn beim Takt $t_i > 30$ ns, $t_p > 50$ ns [5.14]. Der Schaltkreis D 195 vereinfacht. Der Vergleicher erhält die wahren Ausgänge zurückgeführt, um Ringschieben PSU → Speicher → PSU zu ermöglichen (s. Abschn. 5.2.5.1.).

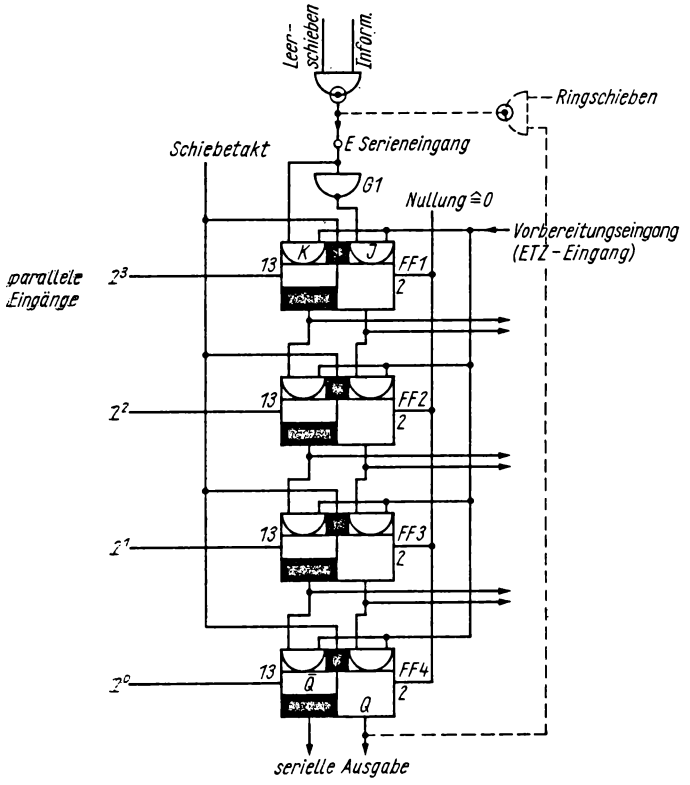


Bild 5.13. 4-bit-Schieberegister, Parallel-Serien-Umsetzer

Die „Adressenspeicher" entschlüsseln und dirigieren die Adressen an den/die

- Verteiler für Schaltadressen zur Weiterleitung an die Arbeitsspeicher
- Achsspeicher
- Achsgruppenspeicher

} für Weginformationen

bzw. direkt an die Bahnsteuerung.

Die 25 Adressen werden bei „Einschreiben" ∧ „Adresse" ∧ „Satzende" in *RS*-FF eingespeichert. Ihre Entschlüsselung bis zur Einzeladresse erfolgt zweckmäßig 2stufig [erste Stufe in Gruppen, zweite Stufe ($\binom{25}{1}$)] unter Verwendung der wahren und negierten Spurensignale; denn 1stufig müßten 8fach NAND (6 Spuren) und zur Fan-out-Bereitstellung ($N_O = 25$) Leistungsgatter verwendet werden.

Durch Zwischenspeicher wird man dann von der Lesereingabegeschwindigkeit unabhängig, wenn die Bearbeitungszeit ≧ Einlesezeit ist. Mit „Bearbeitungsende" und „Zwischenspeicher gefüllt" wird durch einen ETZ der nächste Satz seriell in die Arbeitsspeicher übernommen und sofort ein weiterer Satz zwischengespeichert. Am Beginn werden somit stets zwei Sätze eingelesen. Zwischenspeicherung gestattet „Satzsuchlauf" und „Leserrücklauf" während der Bearbeitung.

Die Befehle D, F, H, S, T sind 2stellig und nur einmal im Satz zugelassen. In die Zwischenspeicher wird die Information bei Übernahme im Ring wieder eingeschoben (Bild 5.14). Bei analoger Vorschubsteuerung dient die erste Ziffer zur Festlegung der Achsgruppe, so daß 3stellige Speicher nötig sind.

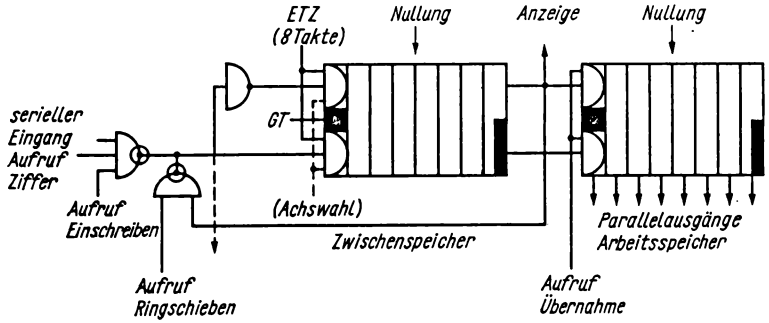


Bild 5.14. Zwischenspeicherung 2stelliger Werte (BCD)

Die Zwischenspeicherung geometrischer Werte geschieht analog Bild 5.14 mit einem ETZ von 28 Takten. Die Eingabeleitungen aller Weginformationsspeicher sind parallelgeschaltet (gestrichelt gezeichnet), die Zuordnung geschieht durch Aufruf.

5.2.1.3. *Betriebsartenwahl*

Die nachfolgenden Betriebsarten der NCM werden in der Baugruppe Ablaufsteuerung verarbeitet. Sie werden am „Betriebsartenwahlschalter" eingestellt, nach Aufruf durch „Start" bzw. „Einschreiben" ($\binom{10}{1}$) abgespeichert und durch „Nullen" gelöscht.

a) Automatikbetrieb mit selbsttätiger Bearbeitung des Gesamtzyklus

Der Leserstart wird gemäß Bild 5.15 ausgelöst.

Automatikbetrieb wird unterbrochen durch

- Taster „Not-Stopp"
- Taster „Vorschub-Stopp" ≙ „Leserstopp"
- Taster „Fehler-Stopp"
- Taster „Korrektur" (rastend).

Er ist vor Einlesen des Satzes zu drücken. Das „Satzende"-Zeichen unterbricht dann die Weiterbearbeitung.

– Taster „Wahlweise Halt" (rastend).

Er stoppt bei Betätigung die Automatik beim nächsten Befehl M 01. In den Betriebsarten „Leserrücklauf", „Suchlauf", „Automatik", „Einzelsatz" wird durch ihn der Leserlauf am Hauptsatzzeichen (:) gestoppt, bei „Automatik" und „Einzelsatz" wird ein mit „/" gekennzeichneter Satz unterdrückt.

– Programmende

– Lochstreifenende

Weiterbearbeitung durch Taster „Start".

Ein Umschalten auf Nullpunktabgleich ist bei Bearbeitung nicht erlaubt.

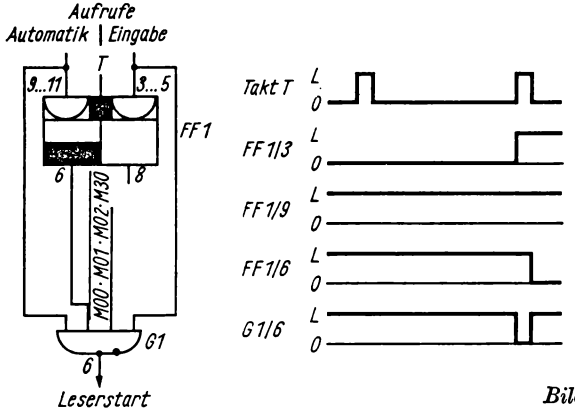


Bild 5.15. Leserstart

b) Einzelsatz mit Bearbeitung eines Programmsatzes und Endmeldung „Informationsbedarf"

Weiterbearbeitung durch Taster „Start"

Unterbrechungsmöglichkeiten wie a).

c) Handeingabe über Adressen- und Ziffern-Vorwahlschalter

Übernahme durch Taster „Einschreiben" bei Anzeige „Informationsbedarf". Bearbeitungsbeginn durch Taster „Start".

d) Satzsuchlauf ohne Informationsspeicherung

Diese Betriebsart dient dem schnellen Suchen eines Satzes. Es werden alle Zeichen außer N überlesen sowie der Leserstopp bei M-Befehlen verhindert.

Die Satznummer wird von Hand eingestellt und Taster „Start" betätigt. Nach Erreichen der Satznummer darf nur weiterbearbeitet werden, wenn der folgende Satz ein Hauptsatz mit allen notwendigen Informationen ist.

Unterbrechung durch „Stopp".

Die Leserichtung wird selbständig ermittelt.

e) Satzsuchlauf mit Informationsspeicherung

Ablauf wie d) (nur vorwärts) unter Speicherung aller Informationen einschließlich der M-Befehle, so daß sofort auf Bearbeiten umgeschaltet werden darf. Unterbrechung durch „Stopp" und „Lesefehler".

f) Einrichtung mit Handeingabe

Von Hand lassen sich Weginformationen zu nullender Achsen, Korrekturwerte oder Werkzeugnummern eingeben, M-Befehle sind wirkungslos.

Für den Vorgang selbst zeigt eine Kontrollampe Istwert – Nullwert < 0 an, und die Steuerung hat nur Anzeige- und Überwachungsfunktion. Bei inkrementalen Meßsystemen dient der Taster „Nullpunktabgleich" zum Zählernullen. Beim „Einrichten" wird der Vorschubsollwert von der NC unterbrochen und auf „Tippbetrieb" vom Maschinentableau umgeschaltet.

g) Einrichten mit Lesereingabe (nur NC 470)

Sie dient zur Eingabe umfangreicher Nullungsprogramme bei absoluter Steuerung. Auslösen eines Satzes durch Taster „Start", weiter wie f).

h) Nullpunktabgleich (nur NC 450)

Durch das Verfahren von Hand bei geöffnetem Lageregelkreis wird der Vergleicher durch die Istwertimpulse beaufschlagt, so daß beim Schließen der Lageregelung der Ausgangspunkt wieder angefahren würde. Durch Nullen des Vergleichers verschwindet die Sollwert-Istwert-Differenz, d.h. die Eingangsspannung des Reglers.

i) Leserrücklauf

Diese Betriebsart ist für Steuerungen ohne Satzsuchlauf gedacht. Nur die Betriebszeichen werden erkannt, Auslösung erfolgt durch Taster „Start". Rücklauf-Stopp bewirken

- Taster „Stopp"
- Taster „Wahlweise Halt" am Zeichen „Hauptsatz" im ISO-Code
- Programmanfangszeichen.

j) On-line-Eingabe (BTR-Anschluß)

Sie ersetzt den Leser durch direkte Datenkanäle zu einem übergeordneten Rechner (s. Abschnitt 10.) und gestattet die Betriebsarten a), b), e), f), g), h).

5.2.2. Handeingabe

5.2.2.1. *Tastersynchronisation* [5.15] [5.16]

Weil Taster zu beliebiger Zeit beliebig lange (statisch) betätigt werden können, ist ihre Information synchron in die Taktfolge prellfrei einzubauen. Ein ausreichender Kontaktstrom ist zu garantieren.

Die Schaltung nach Bild 5.16 ergibt Dauersignal an *FF2* bis zur Löschung. Die stabile Lage ist *FF1/8* = 0, die auch in der Öffnungs-Prellphase erhalten bleibt, wenn *J* und *K* von *FF1* „0"-Signal aufweisen. Beim prellenden Schließen genügt der erste Nullimpuls auf *G2/4*, um *FF1/8* = L. Das Integrierglied flacht die Schaltflanken ab (Störsicherheit). Das Signal wird unabhängig vom Taster im nächsten Takt im *FF2* abgespeichert.

Die Schaltung nach Bild 5.17 ergibt Signal über eine Taktbreite (Ein-Impuls-Schaltung). Sie ist damit gut für Nullung, Übernahme, Einspeichern und ähnliches geeignet ($t_{PT} \geqq 50$ ns). Der niederohmige Widerstand *R* garantiert einen

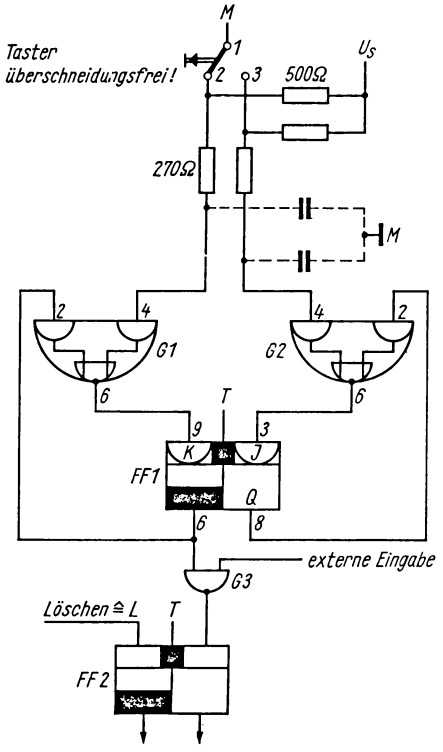


Bild 5.16. Tastersynchronisation

genügend großen Ruhestrom. Mit Einfachkontakten kommt man aus, wenn ein verzögerndes I-Glied (*R2, C* im Bild 5.18) mit Trigger aufgebaut wird (Dimensionierung s. [5.17]). Bei 10 mA Kontaktstrom und 5 V liegt die Ansprechspannung bei 2,6 V, die Abfallspannung bei 1,2 V. Die erreichten Anzugs- und Abfallverzögerungen durch das I-Glied liegen im ms-Bereich.

Bei $U_S = 24$ V ist die Hysterese $\geqq 6$ V. Eine Diode sorgt bei höherer Kontaktspannung gegenüber der Triggerspannung für $t_{an} \approx t_{ab}$ [5.15].

5.2.2.2. *Vorwahlschalter*

In die numerischen Steuerungen werden vom Bedienenden über den Bearbeitungszyklus feststehende, im Programmbüro jedoch noch nicht zu ermittelnde Zahlenwerte sowie Sollinformationen von Hand eingegeben:

- Festwerte (6- bis 7stellig) zur Kennzeichnung der Lage des Werkstücknullpunktes, bezogen auf den Maschinennullpunkt
- Festwert-Transformation (6- bis 7stellig) für ein zweites Werkstück
- Korrekturwerte (5- bis 6stellig) zur Berücksichtigung der Werkzeugabmessungen, wie Werkzeuglänge und -durchmesser
  Ihr Abruf ist mit dem Einsatz des Werkzeugs gekoppelt (meist auch visuell sichtbar gemacht).

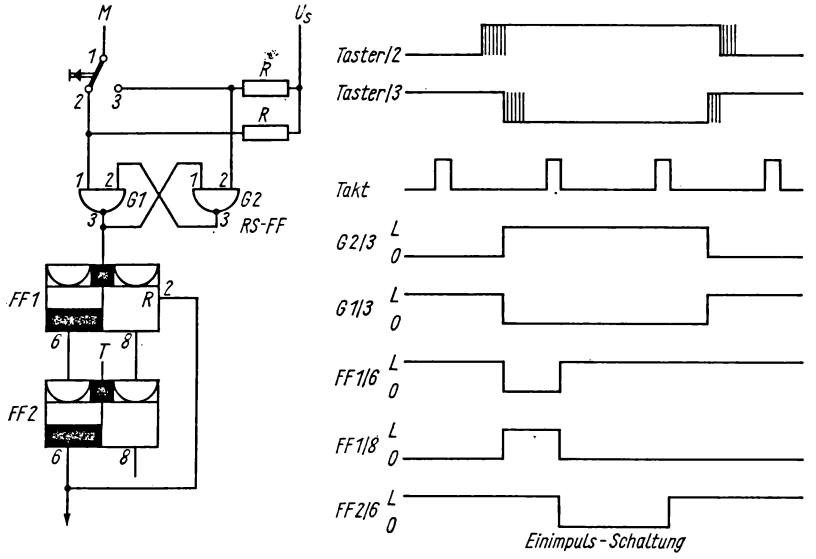


Bild 5.17. Tastersynchronisation

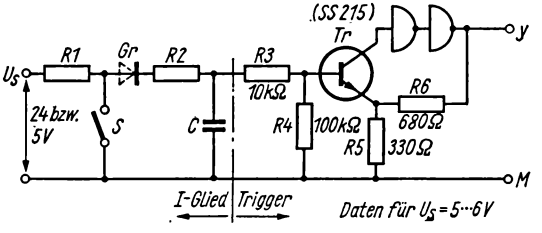


Bild 5.18. Taster mit Trigger

- Satznummern (3stellig) als Vorwahl für Satzsuchlauf
- Vorabschaltwerte (teilweise, da diese meist fest eingelötet werden)
- Koinzidenzfälschung (2stellig) zum Spreizen der Hauptkoinzidenz zu einem Koinzidenzbereich
- Unterprogramme (z. B. bei NC 430, 3stellig)
- Werte eines vollständigen Satzes mittels Handeingabe (7stellig)
- Sollwerte bei Positionsanzeigen (5- bis 7stellig), parallel.

Bei mehreren gleichartig wirkenden, ausgangsseitig parallelliegenden Schaltergruppen, deren Aufruf seriell erfolgt, ist Entkopplung mit Dioden (Bild 5.19) oder Schaltkreisen (Bild 5.20) nötig, wobei die erstere Lösung bei vielen, die letztere bei wenigen parallelliegenden Schaltern vorzuziehen ist.

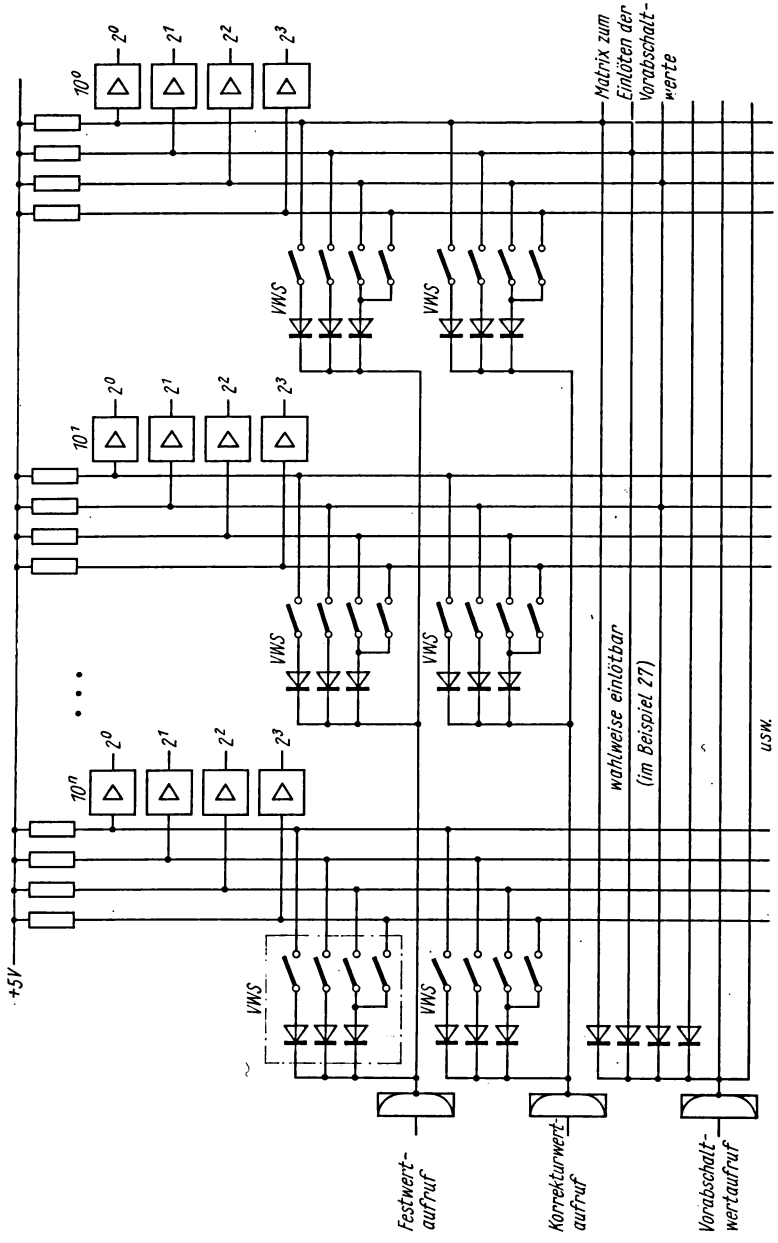


Bild 5.19. Vorwahlschalter, diodenentkoppelt

Man kann eine Diode je Tetrade einsparen, da die Informationen 2^2 und 2^3 einander ausschließen. Alle Dioden $2^k \cdot 10^n$ bilden einen passiven UND-Knoten. Nachteilig ist das nahezu strom- und spannungslose Schalten der Vorwahlschalter, die erst danach durch 0-Signal aufgerufen werden. Vorteilhaft ist die billige Entkopplung.

Durch die passiven Dioden tritt infolge deren Schleusen- und Flußspannung in Verbindung mit etwa 2 m Leitungslänge ein Anheben des Nullsignalpegels am Vorwahlschalter-Ausgang in den verbotenen Bereich $\leqq 0{,}8$ V ein. Zur Pegelregenerierung sind schnelle Anpassungsverstärker ($t_v < 100$ ns) nötig. Bezüglich Koppelkapazität (hochohmig wegen Diode) und dynamischen Verzögerungszeiten (gemessen wurden am Ausgang etwa 480 ns Verzögerung bei 45 parallelen Dioden) s. [5.17] [5.18]. Abhilfe schaffen Germaniumdioden (0,15 V Flußspannung), Eingangsbeschaltung gegen U_S (3,3 Ω, $U_{IL} \leqq 0{,}55$ V, $t_{DLH} = 20$ ns) u.ä.

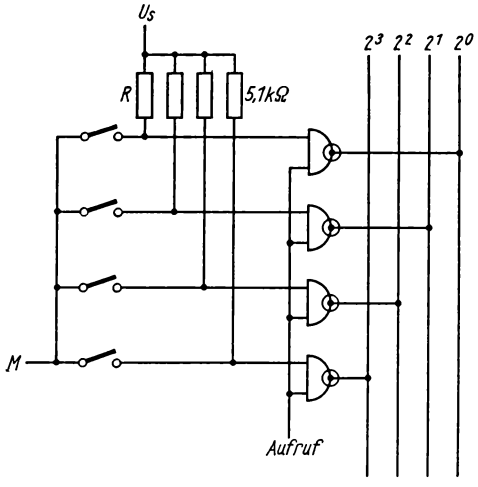


Bild 5.20. Vorwahlschalter, gatterentkoppelt

Die aktive Gatterentkopplung (Bild 5.20) vermeidet die genannten Nachteile bei erhöhtem Aufwand. Bei geöffnetem Kontakt fließen $J_{IH} \leqq 40\ \mu$A in den Schaltkreis, und es steht eine Spannung an von

$$U_{IH} \geqq U_{S\min} - J_{IH} \cdot R = 4{,}75 - 0{,}2 = \underline{4{,}55\text{ V}}.$$

Bei geschlossenem Kontakt werden $-J_{IL} \leqq 1{,}6$ mA und $U_{IL} \leqq 0{,}4$ V, so daß über R

$$I \leqq \frac{U_{S\max} - U_{IL}}{R} = \frac{5{,}25 - 0{,}4}{5{,}1} \approx 1\text{ mA}$$ fließen.

Der zu garantierende Wert $U_{IL} \leqq 0{,}4$ V legt den zulässigen Kontaktübergangswiderstand nach Masse fest, der unkritisch ist.

5.2.2.3. *Handeingabe von Programmsätzen*

Die Adressen und das Zeichen „Satzanfang" werden mit 24stelligem Schalter vorgewählt, die numerische Eingabe erfolgt über eine dekadische Vorwahlschalter-

gruppe. Beide werden durch den Taster „Einschreiben" zur Informationsabgabe an die Speicher mit Hilfe eines ETZ (s. Abschn. 5.2.1.2.) aufgerufen.

Die Handeingabe ist auch zwischen zwei Sätzen des Leserbetriebs zur Korrektur des Lochstreifenprogramms möglich.

Die serielle Abfrage der Handeingabegeräte (gleiche Informationsart wie vom Leser) simuliert der Handeingabe-Stellenzähler, ein 4-bit-Vorwärtszähler als Verteiler (s. Bild 5.51, S. 179), dessen Dualwerten folgende Bedeutung zukommt (Bild 5.21):

0	1	2	3	4	5	6	7	8
Adresse	Vorzeichen	10^6	10^5	10^4	10^3	10^2	10^1	10^0

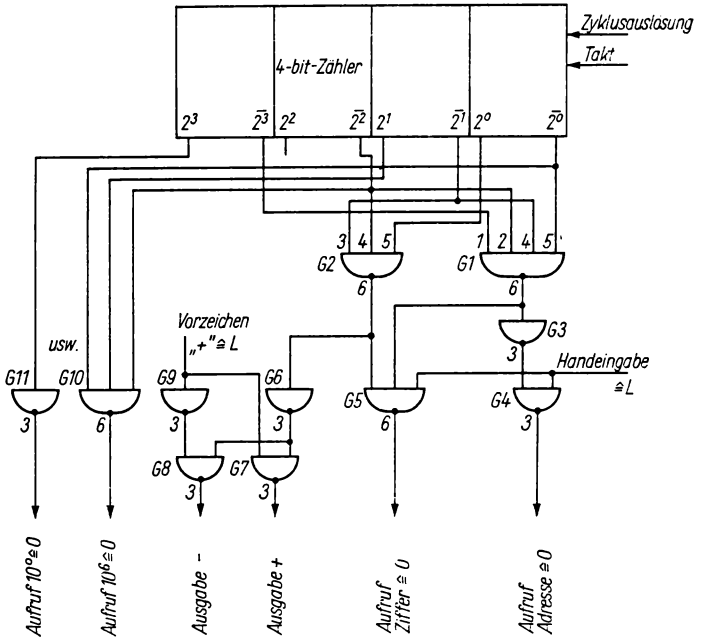


Bild 5.21. Handeingabe, Verteiler

5.2.3. Lesereingabe

5.2.3.1. *Lochstreifenleser*

Mit Ausnahme von Bahnsteuerungen mit Außeninterpolator und solchen mit Magnetbandkassetten werden numerische Steuerungen meist mit fotoelektrischen Lochstreifenlesern mit 120 bis 500 Zeichen/s ausgerüstet.

In der DDR wurden auf der Grundlage der RGW-Empfehlung RS 196-64 in TGL 24496 Festlegungen zum Lochstreifen (Bild 5.22) getroffen.

Definition: Ein Lochstreifen ist der Träger maschinell lesbarer Zeichen in Form von Kombinationen aus Löchern und „Nichtlöchern". Er enthält weiterhin Löcher (Spur *T*) zum Taktgeben für Abtasten und/oder zum Bandvorschub.

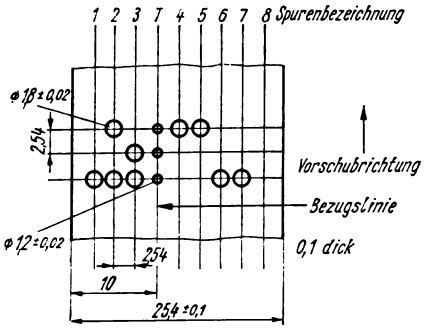


Bild 5.22. Lochstreifen

Im RGW ist für NC einheitlich der 8spurige Lochstreifen festgelegt.

An die Lochstreifenpapiere werden hohe Forderungen bezüglich Abriebfestigkeit, Maßkonstanz, Transparenz (für fotooptische Geräte 40 bis 50%) und Durchlaufzahl ($\geqq$ 1000) gestellt. Auch folie- bzw. metallbeschichtete Ausführungen sind bekannt.

Elektromechanische Lochstreifenleser sind billig, aber anfällig gegen mechanische Beschädigungen der Bürsten beim Streifeneinlegen und Reinigen.

Fotoelektrische Leser sind in beiden Transportrichtungen einsetzbar. Sie erhalten wahlweise Auf- und Abwickeleinrichtungen für Lochstreifen bis 120 m Länge, teilweise nur Abspulgeräte. Der Zug durch die Wickeleinrichtung muß mit dem Leser abgestimmt sein. Der Lochstreifentransport wird allgemein durch Reibräder erwirkt. Damit zeichengerecht, d.h. spätestens auf dem folgenden Zeichen angehalten wird (Überlaufweg $\leqq$ 2,5 mm), ist eine mechanische Bremse installiert.

Der Leser erfüllt folgende Funktionen:

- Streifenvorschub und -stillsetzen, extern angeregte Kupplungen
- Abtasten der 8 Informationsspuren gemäß Abschn. 3.2.1., Formung und Verstärkung der Signale, z.T. Speichern der Signale, zeichengerechtes Löschen (Bild 5.23)
- Signalausgang mit steilen (50 ns), z.T. auch flachen (0,7 ··· 1,5 µs) Flanken, Lesesicherheit $\leqq 10^{-7}$
- Bereitschaftsinformationen mit Netzteil- und Glühlampenüberwachung; Lochstreifen eingelegt (Transportspurabtastung), nicht gerissen, nicht völlig an einer Umwicklerspule abgewickelt
- Start- und Stoppsignal
- Richtungswahl
- Signalausgabe „Information gültig"
- Einstellung eines Ausgangszustands bei Netzzuschaltung
- Auf- und Ab- bzw. Umwickeln des Streifens.

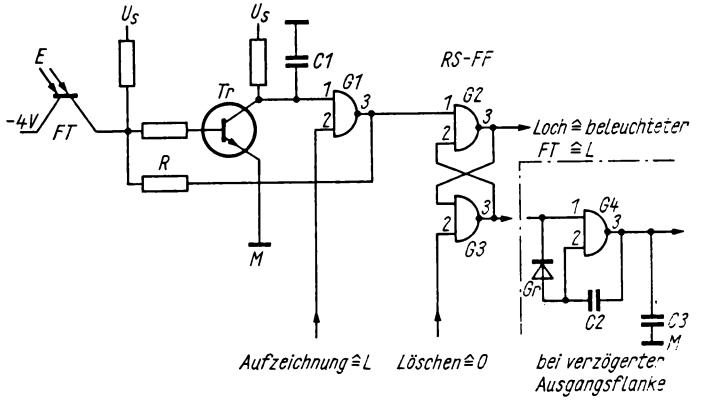


Bild 5.23. Spurenabtastung und Speicherung im fotoelektrischen Leser

Die positive Rückführung über *R* erwirkt Kippverhalten, *C1* dient zur Entstörung. Bei beleuchtetem Fototransistor *FT* ist *Tr* geschlossen. Der Löschimpuls (50 µs) wird beim Einlauf in ein Zeichen von der Vorderflanke des Signals der Transportspur abgeleitet. Nach der Löschung wird bei gegebenen Bedingungen für eine Aufzeichnung ein etwa 2 µs dauernder, über ein D-Glied gewonnener Aufzeichnungsimpuls an *G1/2* gegeben.

5.2.3.2. *Leseransteuerung*

Die Leseransteuerung erfüllt die Aufgaben

- Leser starten und stoppen
- Leserichtungsausgabe beim fotoelektrischen Leser
- Informationsübernahme und Synchronisation
- Speicherung der Spureninformation, soweit nicht im Leser selbst enthalten.

Bei „Leserstopp" und „Paritätsfehler" wird kurzzeitig (monostabile Kippstufe) ein Stromstoß als Schnellerregung an die Stopp-Kupplung des Lesers gegeben. Auch eine Richtungsumkehr verlangt ein zwischengeschaltetes Haltesignal.

Das Signal „Information gültig" wird dann ausgegeben, wenn alle Spureninformationen sicher gelesen und eingeschrieben sind. Drei Fälle sind zu unterscheiden:

- Start auf dem Bandsteg gibt erst beim Erreichen des nächsten Transportlochs die Informationen frei
- Start auf dem Transportloch gibt die Informationen sofort frei
- Start auf einem schon gelesenen Zeichen verhindert die Ausgabe, da der Kondensator *C3* (s. Bild 5.24) der Zeitstufe noch geladen ist.

Leserrücklauf wird am Programmanfang, bei Lesefehler der Adresse N sofort sowie nach Tasterbetätigung „Wahlweise Halt" am Hauptsatz gestoppt. Der Lochstreifen kann damit an beliebiger Stelle eingelegt und durch Leserrücklauf auf den Anfangspunkt gespult werden.

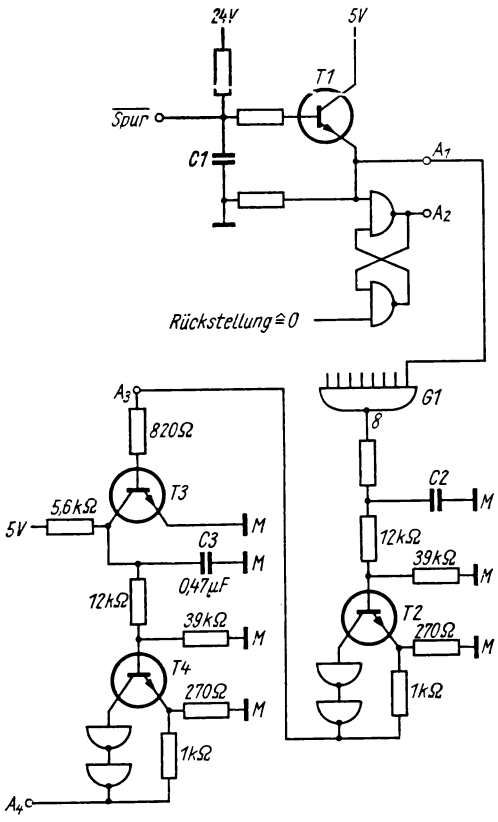


Bild 5.24
Informationsübernahme beim mechanischen Leser

Die Informationsspeicherung beim mechanischen Leser (VEB Secura Berlin) erfolgt prellfrei über Pegelanpaßverstärker beim ersten Nullimpuls an den Bürsten, Ausgang A_2 = L im Bild 5.24.

Das Signal der Transportspur wird wegen schwieriger Justage elektronisch an *G1* gebildet, indem alle 8 Ausgänge A_1 zusammengeführt werden. Beim Ansprechen der ersten Spur wird *T3* gesperrt und *C3* aufgeladen. Die Triggerzeit (etwa 6 ms) überbrückt die Prellphase. Mit A_4 wird die synchrone Übergabe des Signals aller Spuren an die NC angeregt. Während dieser Zeit (1 bis 1,2 ms) ist der Leser durch das Start-FF gestoppt, d.h., es werden Einzelzeichen eingelesen.

Die Rücksetzung und Entladung von *C3* erfolgt mit *G1/8* = 0, wenn alle Bürsten auf dem Steg zwischen zwei Zeichen stehen.

5.2.3.3. *Zeichen- und Paritätsprüfung; Zeichenentschlüsselung*

Diese Baugruppe ist codeabhängig, wobei die Anschlüsse zwecks wahlweiser Bestückung und Austauschbarkeit übereinstimmen müssen. Jede der beiden Karten-

baugruppen erfüllt folgende Funktionen:

- Paritätsprüfung
- Zeichenentschlüsselung
- Auswertung „Programmanfang" und „Klammer"
- Satzunterdrückung
- Wahlweise Halt (s. Abschn. 5.2.4.2.).

Die 8 Informationen liegen negiert an, die wahren Signale werden gebildet.

Die Paritätsprüfung (Bild 5.25) erfolgt bei

ISO-Code auf Geradzahligkeit

EIA-Code auf Ungeradzahligkeit,

so daß $F_{\mathrm{ISO}} = \overline{F_{\mathrm{EIA}}}$; F Fehler

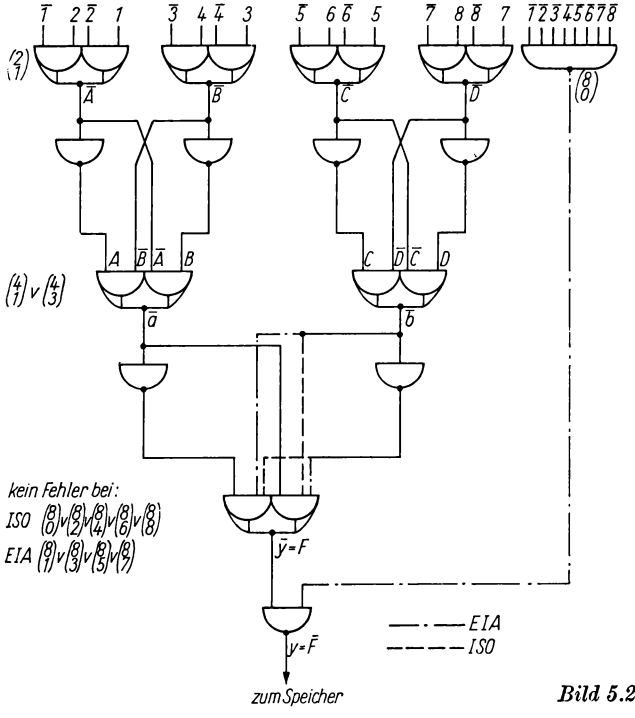


Bild 5.25. Paritätsprüfung

Der ISO-Code fordert:

$$F_{\mathrm{ISO}} = \bar{g}_8 = u_8 = \binom{8}{1} \vee \binom{8}{3} \vee \binom{8}{5} \vee \binom{8}{7}; \tag{5.1}$$

g_i geradzahlig; u_i ungeradzahlig; i Zahl der verknüpften Spuren.

1. Stufe:

4×2 Eingänge verglichen $u_2 = \binom{2}{1}$

$\overline{A} = \overline{\overline{1}\,2 \vee \overline{2}\,1}$; $\overline{B} = \overline{\overline{3}\,4 \vee \overline{4}\,3}$ usw.

$u_2 \to \overline{A} = 0$; denn $1 \neq 2 \triangleq u_2$ analog $\overline{B}, \overline{C}, \overline{D}$

$1 = 2 \triangleq g_2$

2. Stufe:

2×2 Eingänge verglichen $u_4 = \binom{4}{1} \vee \binom{4}{3}$

$\bar{a} = \overline{\overline{A}\,\overline{B} \vee \overline{\overline{A}}\,\overline{B}}$

$u_4 \to \bar{a} = 0$; denn $A \neq B \triangleq g_2\, u_2 = u_4$

$A = B \triangleq (g_2\, g_2) \vee (u_2\, u_2) = g_4$

analog $\bar{b}$

3. Stufe:

1×2 Eingänge verglichen, ergibt Gl. (5.1):

$\bar{y}_{\mathrm{ISO}} = \overline{a\,b \vee \bar{b}\,\bar{a}}$; $g_8 \to \bar{y} = 0 \equiv F_{\mathrm{ISO}} = 0$;

denn $a \neq b \triangleq g_4\, u_4 = u_8$

$a = b \triangleq (g_4\, g_4) \vee (u_4\, u_4) = g_8$.

Beim EIA-Code wird durch das Vertauschen zweier Anschlüsse der 3. Stufe die Aussage $\bar{y}$ in Ungeradzahligkeit gewandelt:

$\bar{y} = \overline{a\,\bar{b} \vee b\,\bar{a}}$; $u_8 \to \bar{y} = 0 \equiv F_{\mathrm{EIA}} = 0$ mit $a \neq b$ wie oben.

Bei Bandlauf wird die Fehlerausgabe unterbrochen.

Ein Paritätsfehler wird angezeigt und sperrt den Arbeitsbeginn. Er wird entweder durch „Leserlauf" $\wedge$ „Eingabezyklus" aufgehoben, wodurch beim zufälligen Zurücklegen des Lochstreifens auf ein Satzendezeichen und nachfolgendem Start keine Bearbeitung ohne einen Lesevorgang eingeleitet wird, oder durch Leserrücklauf bis zum Hauptsatz bzw. Programmanfang gelöscht.

Die freie Wortlänge der Koordinatenwerte (ohne Mitschreiben der vorderen Nullen) gestattet keine Syntaxprüfung (Wortlängenprüfung, Zeichenzahl/Wort). Sie setzt sich wegen der Einsparung an Lochstreifenlänge immer mehr durch. Wird Längsprüfung der Information gefordert, ist feste Wortlänge vorzuschreiben, und jede Adresse setzt einen Wortlängenzähler entsprechend den erwarteten n Zeichen auf $n + 1$, dessen Wert mit jedem Zeichen um 1 vermindert wird. Im Takt $n + 1$ wird eine neue Adresse erwartet, bleibt sie aus, führt Fehlersignal zum Stopp.

Verzicht auf Wortlängenkontrolle erhöht die Verantwortung des Programmierers, der neben der Semantik (Wortbedeutung) auch sicher die Syntax der Sprache einzuhalten hat.

Die Zeichenentschlüsselung trennt in Ziffern, Adressen und Betriebszeichen (vgl. Abschn. 2.6.2.). Zum Beispiel ist beim ISO-Code die Ziffernbedingung $5\ 6\ \overline{7}$, lediglich der Hauptsatz ist konjunktiv auszuschließen $\overline{2\ 4\ 5\ 6\ \overline{7}}$.

Beim EIA-Code sind die Bedingungen unübersichtlicher, z.B. lautet die Ziffernbedingung hier schon

$$(\overline{6}\ \overline{7}\ \overline{8}) \wedge (\overline{1}\ \overline{2}\ \overline{3}\ \overline{4}\ \overline{5}\ 6\ \overline{7}\ \overline{8}) \wedge (\overline{2\ 4 \vee 3\ 4}) \wedge \overline{(\overline{1}\ \overline{2}\ \overline{3}\ \overline{4})}\ .$$

Durch Klammern „(" und „)" werden beliebige Informationen (Klartext) auch dann überlesen, wenn sie nach „Programmanfang" stehen, vor diesem sind alle Informationen wirkungslos.

Beim EIA-Code sind keine Klammern vorgesehen. Dafür steht eine wahlweise Belegung von 2 NAND mit 8 Eingängen nach beliebiger Festlegung zur Verfügung. Soll nur ein Zeichen die Funktion beider übernehmen, muß eine spezielle Ein-Impuls-Schaltung (Bild 5.26) verwendet werden. Am Ausgang *FF2/6* entsteht je 0L-Übergang von E_1 ein Impuls definierter Breite. *FF3* erzeugt ein Signal zwischen zweien dieser Impulse, im Fall der „Satzunterdrückung" zwischen den beiden „/"-Zeichen.

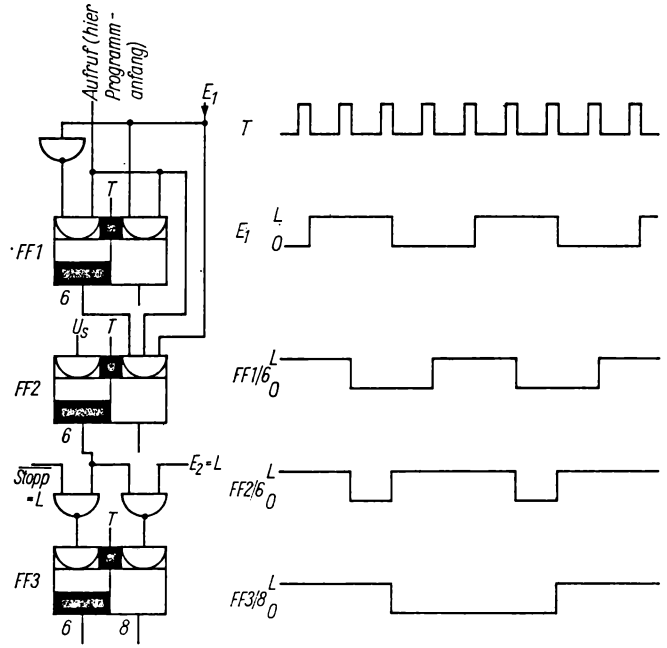


Bild 5.26. Ein-Impuls-Schaltung

5.2.3.4. *Satzsuchlauf*

Zweck dieser Baugruppe ist es, den Leser an einer von Hand voreingestellten Satznummer zu stoppen. Der Suchlauf erfolgt in beiden Richtungen, wodurch Satzwiederholung ermöglicht wird. Zwei Varianten sind vorgesehen:

- Satzsuchlauf ohne Speichern der Informationen außer den Satznummern N
- Satzsuchlauf mit Speichern der Informationen.

Zunächst wird die Leserichtung aus

$$N_{\text{Ist}} \lessgtr N_{\text{Soll}}$$

erkannt (Bild 5.27). Beginnend bei der niedrigsten Stelle $2^0 \cdot 10^0$ werden der Sollwert b_k (aufgerufen vom ETZ aus der Handeingabe) und der Istwert a_k (N-Speicher wird im Ring geschoben zur bitweisen Eingabe) verglichen und das Ergebnis im RS-FF gespeichert. Der Speicherinhalt wird überschrieben, wenn in einer höheren BCD-Ziffer ein anderes Ergebnis eintritt. Die Ausgabe an den Leser erfolgt erst nach Durchlauf aller 12 Vergleichstakte.

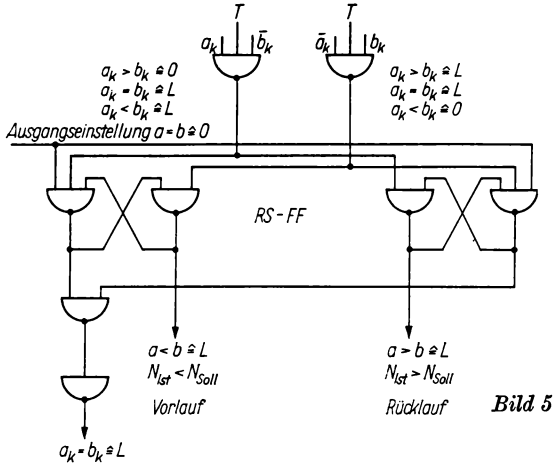


Bild 5.27. Satznummernvergleich

Beim Suchlauf ohne Speichern (vorwärts) werden alle Adressen gespeichert, um durch Überlauf nach dem Stoppkommando keinen Informationsverlust zu erleiden.

Bei Rücklauf müssen alle Ziffern ins dreidekadische Schieberegister eingeschrieben werden, da die Adresse erst nach den Ziffern gelesen wird. Gesteuert wird dieser Vorgang im Verteiler. Da N konstante Wortlänge hat, stehen die drei Dekaden der Satznummer in richtiger Reihenfolge im Register, wenn Adresse N erkannt wird.

Beim Suchlauf mit Speicherung werden die Informationen N, G, M, F, S, T, H, D, E, L abgespeichert, da diese so lange gültig sind, bis sie entweder gelöscht oder überschrieben werden.

Wegadressen gelangen nicht in die Achsspeicher, wodurch Bewegungsvorgänge unterbleiben. Mit dieser Betriebsart kann eine Bearbeitung an beliebigem Satz begonnen bzw. fortgesetzt werden.

5.2.4. On-line-Eingabe

Die Zeichen (8 bit) gelangen in gleicher Codierung (BTR-Anschluß) von einem direkten Datenkanal im TTL-Pegel negiert in die NC. Die Information der Transportspur wird durch einen Übernahmeimpuls von $\geqq 10$ µs Dauer ersetzt.

Die NC signalisiert an den Rechner die „Informationsübernahme" und „interner Fehler".

5.2.5. Sollwertspeicherung, innere Abläufe

5.2.5.1. *Register als Speicher*

Die Schieberegister (Bilder 5.11 bis 5.13, s. S. 135ff.) werden zu beliebiger Länge ($4\,n$ bit), $n \in G$) kombiniert. Eingeschoben wird mit einem der Registerlänge angepaßten Eingabetaktzyklus. Der größte Speicher ist der 32-bit-Sollwertspeicher (4 Gatter D 191), von dem 28 bit ausgenutzt werden. Das Vorzeichen wird getrennt in einem FF verarbeitet. Ein ständiges Ringschieben über den Parallel-Serien-Umsetzer (Bilder 5.13, 5.28) mit Eingabe jeder Tetrade bewirkt, daß die zuerst übernommene höchste Dekade am Ende des Zyklus hinten im Register steht. Dieses Ringprinzip läßt variable Wortlänge zu, weil die höchsten, nicht geschriebenen Stellen automatisch Null bleiben, wenn das Register am Anfang genullt wurde.

Die Achsenspeicher der Punkt-Strecken-Steuerung NC 470 werden einer der beiden Achsgruppen über eine Matrix zugeordnet. Die Löschung erfolgt achsgruppenbezogen beim „Nullen" und „Löschen". Gleichermaßen projektierbar ist die Zuordnung zu Anzeige-Achsgruppen. Eine Kombination verhindert den Anzeigeaufruf vor Einlesen der Achse.

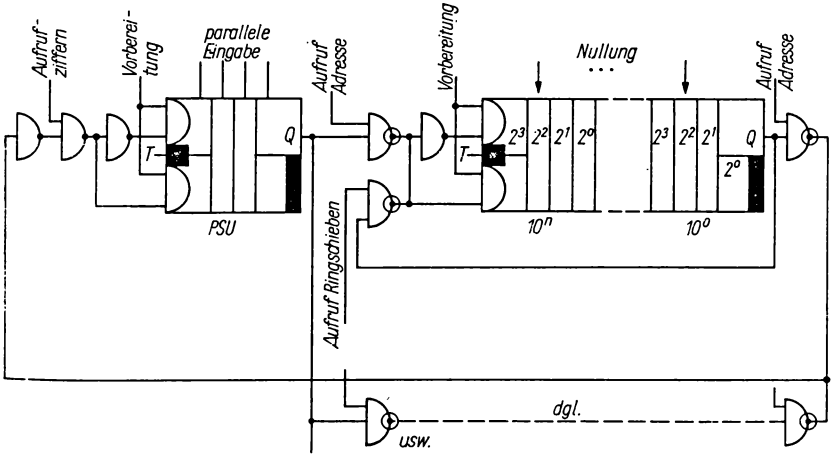


Bild 5.28. Speicherung durch Schieberegister

5.2.5.2. *Zusatzfunktionen (M-Befehle)*

In einem Satz können mehrere dieser Zusatzfunktionen stehen, so daß der M-Speicher mehrfach zu nutzen ist. Ist er gefüllt, wird mit dem Einlesen der nächsten Adresse „M" der Leser etwa 80 ms gestoppt, bis die erste M-Funktion an den Anpaßteil ausgegeben ist. M00, M01, M0L und M30 (Tafel 2.6) wirken auf den Automatikbetrieb ein.

5.2.5.3. *Wegbedingungen G (Ablaufwählfunktion G beim EIA-Code)*

G-Befehle werden in einem 8-bit-Schieberegister (s. Bild 5.28) eingespeichert, das durch einen Löschzyklus (12 Takte) beim Auftreten einer G-Adresse leergeschoben wurde.

Die im Pufferspeicher stehende Information wird entschlüsselt und einer der G-Gruppen zugeordnet.

Die Abläufe im System NC 400 sind so gewählt, daß die Arbeitsspeicher während des Einlesens des nächsten Wortes gelöscht und neu eingeschrieben werden. Es ist demnach Bedingung, daß auf eine G-Adresse eine weitere Adresse im Satz folgt (eventuell Wiederholung). Bei Handeingabe eventuell zweimal übernehmen!

Bis zu 4 G-Adressen im Satz sind möglich, die unterschiedlichen G-Gruppen (A bis N nach Tafel 2.7) angehören müssen. Innerhalb der Gruppen schließen die Funktionen einander aus. Aus der Befehlsnummer im BCD wird die Gruppe erkannt und aufgerufen. Zur Einsparung von FF werden die einer Zehnergruppe, z.B. $4 \cdot 10^1$, zugehörigen Informationen weiter im BCD gespeichert und danach erst $\binom{10}{1}$ entschlüsselt.

5.2.5.4. *Kettenmaß*

Im Eingabetaktzyklus erfolgt die tetradische Umrechnung Kettenmaß (KM) in Absolutmaß (AM), Aufruf G 25 (Bild 5.29):

$$S_{\mathrm{AM}\,n} = S_{\mathrm{AM}\,n-1} + S_{\mathrm{KM}}. \tag{5.2}$$

Die Verrechnung erfolgt 4stufig, zählergesteuert.

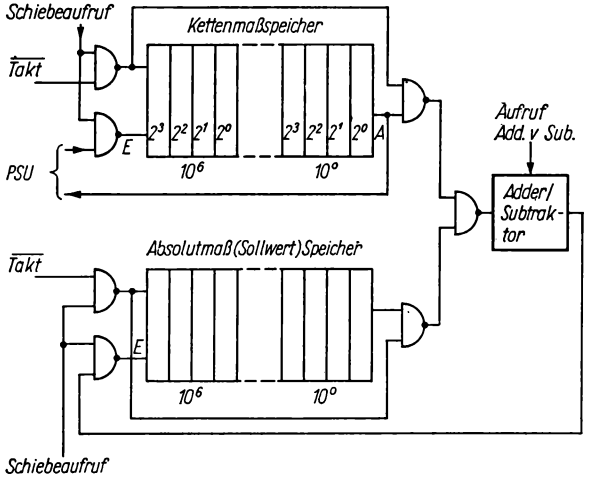


Bild 5.29 Kettenmaßverrechnung

Zählerstellung 0:

- Blockierung der Übernahme des KM in den Sollwertspeicher
- Aufruf des Sollwertspeichers.

Zählerstellung 1:

- Einschieben des KM über den PSU einschließlich Ringschieben.

Zählerstellung 2:

- Blockierung des Übernahmeaufrufs vom Leser bis Beendigung der Verrechnung
- Übernahme der Dekade 10^0 des Sollwertspeichers in das Rechnerregister und Schieben des bisherigen Rechnerinhalts in den Sollwertspeicher
- Addition des Registerinhalts zur 1. Dekade Kettenmaß
- Verrechnung aller 7 Dekaden
- Im 8. Zyklus Einschreiben des Ergebnisses der Dekade 10^6 und gleichzeitig Schieben des ungültigen 1. Einschriebs ins Leere.
- Ohne Übertrag wird die Rechnung abgebrochen und der Ablaufzähler sowie der Achsgruppenspeicher rückgesetzt.

Mit Übertrag ist eine konegative Summe entstanden (s. Abschn. 2.4.5.3.).

Zählerstellung 3:

- Korrektur der konegativen Summe
- Rücksetzen des Ablaufzählers und des Achsgruppenspeichers.

5.2.5.5. *Korrekturwertverarbeitung*

Korrekturwerte werden in Vorwahlschaltern (bzw. in einem Schreib-Lesespeicher, RAM) gespeichert, die auf Grund des 2stelligen H-Befehls ausgewählt werden. Die parallelen Ausgänge des H-Speichers werden $\binom{10}{1}$ decodiert und im Grundausbau zu $\binom{16}{1}$ zusammengefaßt, so daß 16 Korrekturwerte verarbeitet und über Verstärker neben den Schaltern angezeigt werden können. Die Anzahl der Korrekturwerte kann um 2×40 erweitert werden, deren Vorwahlschalter an der Rückseite des Steuerschranks angeordnet sind. Die Decodierung erfolgt aus den $\binom{10}{1}$ jeder Dekade in $\binom{100}{1}$.

5.3. Funktionseinheiten für Istwerterfassung und -entschlüsselung

5.3.1. Funktionseinheiten für inkrementale Geber

5.3.1.1. *Eingangsschaltung*

Die Eingangsschaltung hat drei Aufgaben zu erfüllen:

- Verstärkung der Eingangssignale
- Unterdrückung von Störimpulsen (Gleichtaktunterdrückung)
- Schutz vor unerlaubten Spannungshöhen.

Die Verstärkung mittels Komparators A 110 umfaßt die beiden erstgenannten Aufgaben. Da Störimpulse auf der Signalleitung zum Eingang E_1 und auf ihrer Negation $E_2 = \overline{E}_1$ stets gleichsinnig wirken, können sie durch den auf Δu ansprechenden Komparator unterdrückt werden.

Da bei statischer Signalgabe stets die Ansprechschwelle $\Delta u = 15$ mV durch den L-0-Abstand überschritten wird, herrschen am Ausgang eindeutige Signal-

zustände. Negative Spannungen ($< -0{,}6$ V) halten *Gr1* und *Gr2* fern (Bild 5.30), positive Spannungsspitzen ($> 5{,}6$ V) werden über die Kombination *Gr3*, *Gr4* und Zenerdiode gegen Masse abgeleitet.

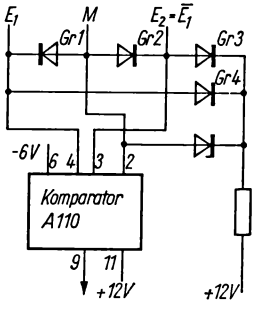


Bild 5.30. Eingangsschaltung (zum IGR gehörig)

Der Eingangswiderstand ist sehr hoch, so daß das Kabel praktisch offen betrieben wird. Die Spannung am Eingang beträgt + 2,5 V für 2 t_v. Der L-0-Übergang bewirkt Reflexionen von etwa —2 V.

5.3.1.2. *Richtungsdiskriminator*

Seine Aufgabe nach Bild 5.31 besteht

- im Erkennen der Zählrichtung aus der Phasenverschiebung der Zählimpulsfolgen Z_1, Z_2, $\bar{Z}_1$, $\bar{Z}_2$
- in der Bereitstellung der Impulsreihe
- in der Impulsvervielfachung
- in der Synchronisation der asynchron einlaufenden Impulse.

Für die Richtungserkennung gilt das Zusammentreffen (Bild 5.32, *G1* bis *G8*):

$$\text{L/0-Übergang} \begin{cases} Z_1 & \bar{Z}_2 = \text{L} \\ \bar{Z}_1 & Z_2 = \text{L} \\ Z_2 & Z_1 = \text{L} \\ \bar{Z}_2 & \bar{Z}_1 = \text{L} \end{cases} \text{mit} \left.\begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \end{array}\right\} \text{Vorwärtsrichtung;} \quad \text{mit} \begin{cases} Z_2 = \text{L} \\ \bar{Z}_2 = \text{L} \\ \bar{Z}_1 = \text{L} \\ Z_1 = \text{L} \end{cases} \left.\begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \end{array}\right\} \text{Rückwärtsrichtung}$$

Der Ablauf der Auswertung ist asynchron. Die Synchronisation eines Impulses und seine Begrenzung auf eine Taktbreite geschieht durch *G11*, das mit allen Zählimpulsen schaltet, wodurch *FF5* synchron mit dem Takt kippt und im nächsten Takt über *G11/1* zurückgestellt wird. Impulsverdopplung und -vervierfachung sind den Bildern 5.31 und 5.32 zu entnehmen.

5.3.1.3. *Nullimpulsauswertung*

Der Nullimpuls wird in Phase mit einer Impulsflanke nach 10^n ($n \geqq 2$, $n \in N$) Impulsen ausgegeben, bei rotatorischem Geber je Umdrehung, bei translatorischem je fester Längeneinheit.

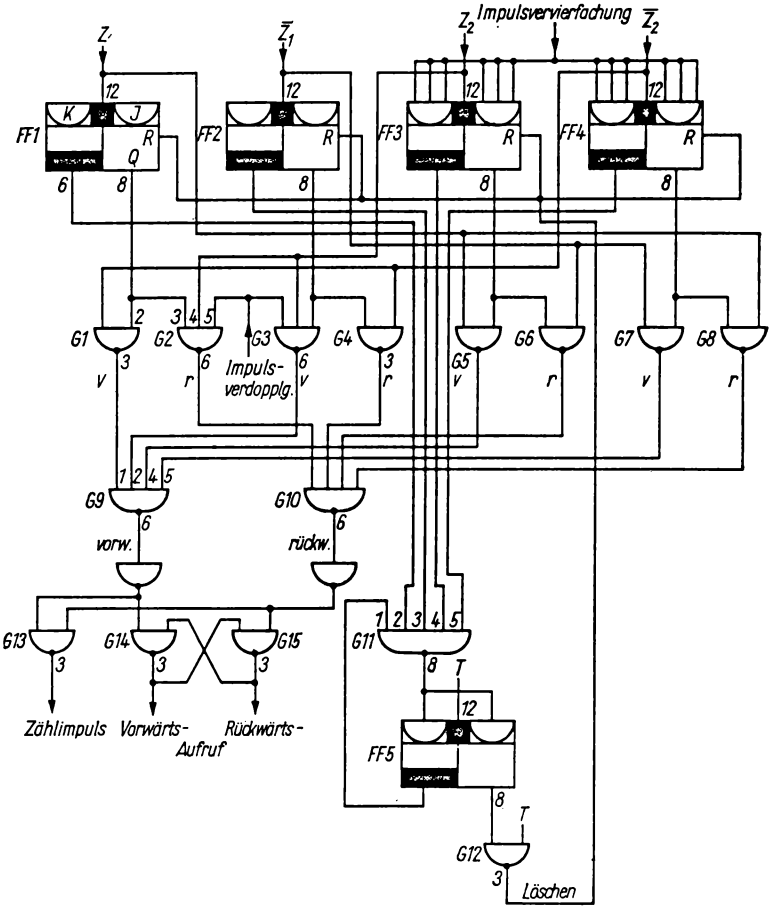
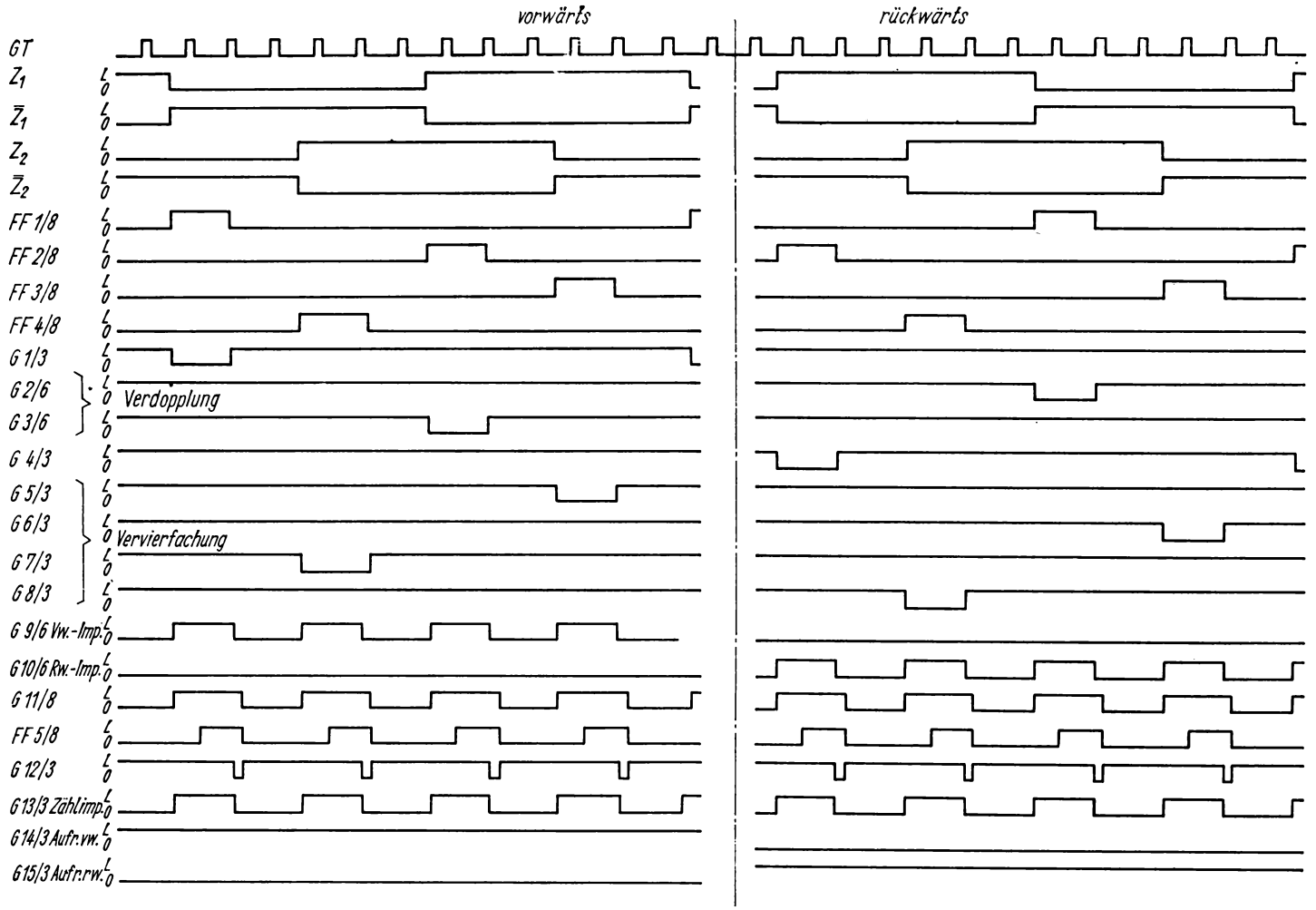


Bild 5.31. Richtungsdiskriminator

Ein 2-bit-Zähler summiert die Zählimpulse und gibt aller 4 Impulse ein Signal aus, das nach 10^n Impulsen mit dem Nullimpuls gleichphasig liegt. Fehlzählung ist so erkennbar mit Ausnahme von 4 k Fehlimpulsen ($k \in N$).

Gleichzeitig dient der Nullimpuls zur genauen Nullung der Meßstrecke, indem das Signal eines relativ grob angeordneten Nullbereichsschalters konjunktiv mit dem Nullimpuls des Gebers verknüpft wird. Die Ansprechgenauigkeit des Nullschalters muß gewährleisten, daß nur ein Nullimpuls erfaßt wird. Die Nullung bei der NC 410 wird im B-Takt eingelagert.


vorwärts
rückwärts
GT
Z1
Z̄1
Z2
Z̄2
FF 1/8
FF 2/8
FF 3/8
FF 4/8
G 1/3
G 2/6
G 3/6
Verdopplung
G 4/3
G 5/3
G 6/3
G 7/3
G 8/3
Vervierfachung
G 9/6 Vw.-Imp.
G 10/6 Rw.-Imp.
G 11/8
FF 5/8
G 12/3
G 13/3 Zähl.imp.
G 14/3 Aufr. vw.
G 15/3 Aufr. rw.
L
0

5.3.2. Funktionseinheiten für absolute Geber WMS 10^6 spv

Die an der NC 470 anschließbaren 6 (theoretisch 12) Winkelmeßsysteme müssen von der NC folgende verstärkte Aufrufe erhalten:

- Aufruf der 6 Dezimalen, dual verschlüsselt ($\triangleq$ 3 bit)
- Aufruf der 4 Tetradenziffern 2^0 bis 2^3, unverschlüsselt ($\triangleq$ 4 bit),

die erst beim Istwertaufruf im Rechenzyklus gebildet werden.

5.3.3. Funktionseinheiten für Inductosyn und Resolver

Der zu vergleichende Sollwert wird mit dem Phasenwinkel eines Zweiphasennetzes (nicht mit der Spannungshöhe) vorgegeben. Die um 90° verschobenen Spannungen u_{21} und u_{22} (s. Bild 3.23, S. 90) gelangen zum Gleiter. Dazu ist DA-Wandlung notwendig, da der Winkel ϑ bzw. der Sollwert digital anliegt [1.1] [3.24] [5.19] [5.20].

Nach *Wollny* und *Winhold* [5.9] [5.20] werden, auf die gleiche Quelle der „Inductosyn Corporation" zurückgehend, die Spannungsamplituden

$$u_{21} = u_2 \cos(\alpha + \beta + \gamma) \text{ mit } \alpha = a \cdot 36° \triangleq 3.\text{ Dekade}$$
$$u_{22} = u_2 \sin(\alpha + \beta + \gamma), \qquad \beta = b \cdot 3{,}6° \triangleq 2.\text{ Dekade}$$
$$\gamma = c \cdot 0{,}36° \triangleq 1.\text{ Dekade}$$
$$a, b, c \in \{0, 1, \ldots 9\}.$$

Unter Verwendung der Additionstheoreme für $\sin(\alpha + \beta)$ und $\cos(\alpha + \beta)$ werden

$$u_{21} = u_2 \cos\beta \cos\gamma [\cos\alpha - \sin\alpha \tan\beta - \tan\gamma \times (\cos\alpha \tan\beta + \sin\alpha)] \tag{5.3}$$

$$u_{22} = u_2 \cos\beta \cos\gamma [\sin\alpha + \cos\alpha \tan\beta - \tan\gamma \times (\cos\alpha - \sin\alpha \tan\beta)]. \tag{5.4}$$

$$\tan\vartheta = u_{22} : u_{21}$$

Der DA-Wandler besteht aus 3 Transformatoren mit je 10 Anzapfungen für die Realisierung obiger 3 Summanden. Gemäß Bild 5.33 gelten folgende Potentiale:

Pot. (1) $A \sin\alpha$

Pot. (2) $A \cos\alpha - B \sin\alpha \tan\beta$

Pot. (3) $A \sin\alpha + B \cos\alpha \tan\beta - (A \cos\alpha - B \sin\alpha \tan\beta) \times \tan\gamma \triangleq u_{22}$ [entspricht Gl. (5.4)].

Potentiale (4) bis (6) gelten für Gl. (5.3).

◀ *Bild 5.32. Taktdiagramm zum Richtungsdiskriminator*

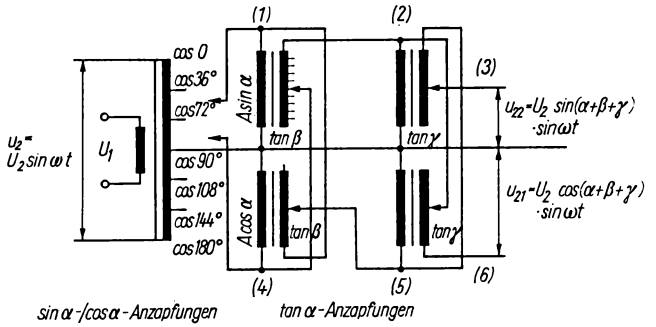


Bild 5.33. DA-Wandler für Inductosyn

Die Konstanten A und B werden mit den Wicklungszahlen gebildet. Diese Anordnung löst 2-mm-(bzw. 2,54-mm-≙ 0,1″)-Strecken bis 2 μm (2,54 μm) auf.

Der DA-Wandlung mit Transformatoren haften die Nachteile analoger Geräte bezüglich ihrer Langzeitgenauigkeit (Anschaltung der Anzapfungen) sowie geringer Herstellungstoleranzen an.

Für eine Anzeige muß der Istwert ins Digitale umgesetzt werden, so daß doppelte Wandlung nötig wird. Eine prinzipielle Anordnung hierzu nennt *Politsch* [3.27] gemäß Bild 5.34. Bei Übereinstimmung der Zählerstellung mit der Läuferlage verschwindet die Fehlerspannung U_F, die im Folgeregelkreis stets gegen Null geführt wird. Die prinzipiell gleichen Verhältnisse herrschen beim Resolver.

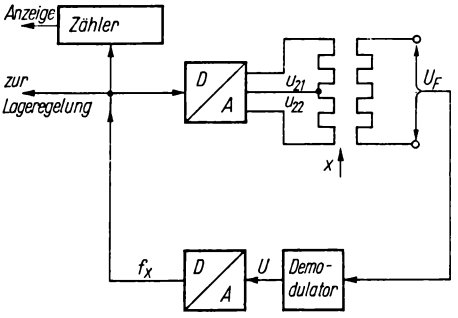


Bild 5.34
Wegmessung mit Inductosyn

Die Meßelektronik endet entweder bei der Bereitstellung von Impulsfolgen oder mit BCD-Ausgang.

Im AD-Wandler erfolgt eine Spannungs-Frequenz-Umsetzung der demodulierten Fehlerspannung (Kondensatorladung und Erzeugung der Pulsfolge durch Kippvorgänge). Es entsteht eine Pulsfolge f_x in Abhängigkeit vom Verschiebeweg x. Da die Messung nur im Bereich von 180° absolut ist, muß die Nachlaufregelung so schnell sein, daß stets die Winkeldifferenz (Regelabweichung) $\varepsilon = \vartheta$ nach Bild 3.23 im Bereich ± 90° bleibt.

In [3.23] ist eine Methode angegeben, aus der Pulsfrequenz f_x die Spannungen u_{21} und u_{22} mit digitalen Mitteln über Rechteckspannungen zu erzeugen. Mittels Fourieranalyse des Rechteckimpulses [2.13, Seite 413, Formel 6] erhält man nach dem Sinus- bzw. Kosinus-Gesetz verlaufende Spannungen u_{21} und u_{21} als Grundwellen, abgeleitet aus der Verschiebung (Breite) des Ausgangs-Rechteckimpulses φ bzw. $\frac{\pi}{2} - \varphi$. Mittels geeigneter Modulationsschaltung (Teiler 1000 : 1) werden 2 mm in 2000 Schritte aufgelöst, indem die Pulsbreite gegenüber einer Referenzspannung variiert wird. Details s. [3.23].

5.4. Funktionseinheiten zur Informationsübertragung

5.4.1. Datennahübertragung

Im allgemeinen können 5-V-Signale ohne Sondermaßnahmen nur 10 bis 20 m weit übertragen werden, was bei großen Maschinen bereits für die Strecke vom Meßwertgeber zur NC unzureichend ist.

Bei hierarchischen Anordnungen (s. Abschn. 10.) mit zentraler Steuer- bzw. Überwachungseinheit sind mit Kabeltreiber(-sender)- und Empfängeranordnungen die üblichen Entfernungen von 100 (bis 1000 m) zwischen Prozeßrechner und NCM zu überbrücken.

In [5.10] wird eine Anordnung für bit-serielle Übertragung im Sendekanal und Quittung im Empfangskanal für den On-line-Betrieb von NCM an einem zentralen Rechner angegeben. Bei 150 µs/Zeichen kann ein mittlerer Satz von 48 Z (wir ermittelten mittlere Satzlängen bei P/S-Steuerungen von $\leqq$ 20 Zeichen) in 14,4 ms einschließlich Quittung übertragen werden, wodurch bei gleichzeitiger Informationsanforderung der 15 angeschlossenen NCM die Wartezeit für den neuen Satz wie bei Leserbetrieb ($\approx$ 225 ms) auftritt. Eine als minimal anzusehende Bearbeitungsdauer von 500 ms/Satz ist somit beherrschbar. Für Entfernungen bis 200 m beim Leitungstyp MY(St) Y $16 \times 2 \times 0{,}5$ sind nach [5.21] nachfolgende, für 5 bis 6 V ausgelegte Schaltungen geeignet.

Die Schaltungen nach den Bildern 5.35 und 5.36 entsprechen dem Vorschlag der Standard-Interface (englisch Übergangsfläche, Grenzschicht) SI 2.2, die besonders für Aufgaben der Prozeßüberwachung geeignet ist. Einspeisung und Entnahme ist durch 16 Abnehmer an beliebiger Stelle möglich, Kabeltreiber und Empfänger sind getrennte Baugruppen.

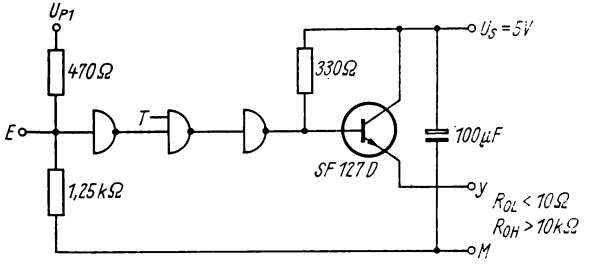


Bild 5.35. Kabeltreiber nach SI 2.2 [5.21]

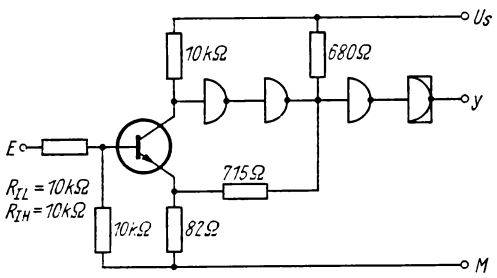


Bild 5.36. Kabelempfänger nach SI 2.2 [5.21]

Schaltverzögerungen: $t_{DLH} \geqq 90$ ns (wächst mit steigendem U_{IL})
$t_{DHL} \geqq 150$ ns (wächst mit fallendem U_{IH})

Die geforderte Impulsform bleibt erhalten.

Die Schaltung nach Bild 5.37 strebt eine Anpassung bei L-Pegel an der Senderseite an. Das Leitungsende ist offen, wodurch Amplitudenverdopplung durch Reflexion und ausreichender H-Pegel auftritt. Die Schaltverzögerungen entsprechen denen der D10-Reihe.

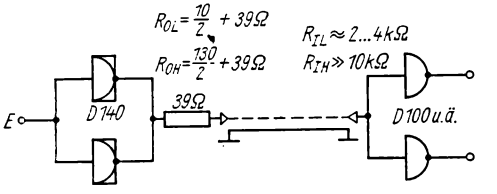


Bild 5.37. Kabelsender und -empfänger [5.21]

Die Entfernung wird durch eintretendes Abflachen der Impulsflanken auf 200 m begrenzt. Darüber treten bei < 1 V/µs Schwingungen auf.

Zur niederohmigen Anpassung des Senders an H- und L-Pegel dient diskreter Aufbau als Gegentaktendstufe (Bild 5.38, Fa. Honeywell).

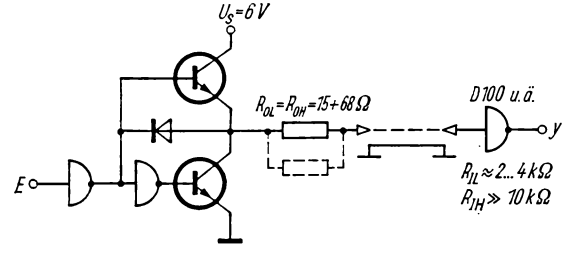


Bild 5.38. Kabeltreiber XD-336, Empfänger DI 335 (Firma Honeywell)

Bei der Signalübertragung sind die Leitungslaufzeiten von 45 bis 75% der Lichtgeschwindigkeit ($\approx$ 13 bis 22 cm/ns) gegenüber den Flankenzeiten der TTL nicht mehr zu vernachlässigen und können die zulässige Taktfrequenz beeinflussen.

Störungen bei der Istwertbildung und -übertragung zwischen inkrementalen Gebern und der NC bedeuten Fehler in der Positionierung. Ihrer Verhinderung dienen [5.22] hohe Formsteife und die Verhinderung von Maschinenschwingungen sowie die im Abschn. 4.3. dargelegten Maßnahmen.

In [5.22] wird nachgewiesen, daß als erste Voraussetzung einer Störunterdrückung die Erzeugung der Impulsreihe einschließlich ihrer Negation anzusehen ist. Dabei ist die exakte 180°-Phasenverschiebung maßgeblich, wenn es sich um schnelle Bauelemente handelt, die bereits bei geringfügigen Zeitunterschieden eine Störunterdrückung verhindern.

5.4.2. Datenfernübertragung

Der Anschluß an eine Rechenstation erfordert oft Datentransport über größere Entfernungen. Am einfachsten steht die Briefpost zur Verfügung, wodurch man jedoch sehr unbeweglich wird. Kurzfristiger Zugriff ist nur mit Datenfernübertragungsanlagen möglich.

Üblich sind Übertragungen im 7-bit- bzw. CCITT-Nr. 2-Code (5 bit) und Übertragungsgeschwindigkeiten bei

- Parallelübertragung von 20/75 Z/s
- Serienübertragung von 50 bis 4800 Bd (Wählleitung)
- in festgeschalteten Breitbandleitungen (Standleitung) bis 200000 Bd [5.22] (1 Baud [Bd] = 1 Übertragungsschritt/s).

Für das öffentliche Fernsprechnetz werden frequenzmoduliert 600 bzw. 1200 Bd empfohlen (Trägerfrequenz 1,5 bzw. 1,7 kHz).

5.5. Funktionseinheiten zur Taktversorgung

5.5.1. Synchrone Arbeitsweise

Numerische Steuerungen werden im allgemeinen synchron betrieben, indem die Signalverarbeitung durch eine Taktimpulsfolge gesteuert und alle Vorgänge durch sich wiederholende Zyklen zeitlich genau definiert abgearbeitet werden. Der bei einigen MHz (im System NC 400 0,5 bis 2 MHz) liegende Grundtakt wird dazu untersetzt, zur Verdichtung der Informationsverarbeitung dienen die beiden versetzten Taktfolgen A und B (NC 410). Die Taktfrequenz wird durch die Verzögerungszeiten in den Gattern und die Signallaufzeiten bestimmt (Berechnung s. Abschn. 5.6.3.), wobei sich ein statischer Zustand zwischen zwei Taktimpulsen eingeschwungen haben muß (Taktintervall > Signallaufzeit zwischen 2 FF). Als Festpunkte synchroner Arbeitsweise dienen Speicher, die nur mit dem Takt schalten. Für eine dynamisch gut entworfene Schaltung sind die Verzögerungszeiten zwischen den Speichern in der Größenordnung einander angenähert.

Synchrone Arbeitsweise ergibt folgende Vorteile:

- Mehrfachausnutzung der Bauelemente
- Verringerung der Störanfälligkeit, indem die JK-Speicher nur kurzzeitig nach Abklingen von Einschwingvorgängen aufnahmebereit sind

- innere Störungen auf Informationsleitungen sind unkritisch (nur Takt-, *R*-, *S*-Leitungen kritisch)
- feste Arbeitsgeschwindigkeiten der Signalverarbeitung und klare Bestimmung zulässiger Laufzeitketten, Einteilung der Schaltung in Abschnitte zwischen zwei Speichern
- Ausschalten von zeitlich bedingten Unsicherheiten durch Laufzeit- und Verzögerungseffekte einzelner Glieder, wodurch kurzzeitig falsche Signale anstehen könnten
- Unabhängigkeit des zeitlichen Ablaufs von den physikalischen Eigenschaften der Bauelemente
- leichtere Prüfung durch Einzeltaktschaltung (Ruhezustände eingebaut)
- Erhöhung der Übersichtlichkeit
- Anwendung der Schaltalgebra auf zeitbezogene Variable.

Nachteil:

- Langsamere Signalverarbeitung gegenüber asynchroner Arbeitsweise, da die physikalischen Eigenschaften der Elemente nicht voll ausgenutzt werden.

Der Takt kann entweder auf der Kartenbaugruppe verstärkt und auf die Takteingänge verteilt werden, oder er wird vorher logisch verknüpft. Durch die Verknüpfung wird Aufwand gespart, die Taktbreite muß jedoch wegen der Gatterverzögerung erweitert werden [5.24].
(Beachte: Das an der L-0-Flanke schaltende *RS*-FF würde die *JK*-Eingänge innerhalb des Taktes ändern.)

5.5.2. Taktversorgung, unstabilisiert

Die Frequenztoleranz des Taktes darf $\pm$ 15% sein (NC 410), wenn von ihm keine Bewegungsvorgänge abgeleitet werden. Der Grundtakt wird einem astabilen Multivibrator (Dauerschwinger, Bild 5.39, oben) entnommen, der durch die laufende Umladung von *C1* (Zeitkonstante $C1 \cdot R1$) schwingt, da jeder Signalwechsel an *G4/3* die Umladung von *C1* verursacht.

Eine teilweise Temperaturkompensation erreicht man durch einen Thermistor (temperaturabhängiger Halbleiterwiderstand, Typ TN mit negativem Temperaturwert), der die Frequenzerniedrigung bei höherer Temperatur durch Senkung der Schaltschwelle (Zeitkonstanten) von *G3* kompensiert. Beim Einschalten erzeugt die Schaltung stets eine L-0-Flanke. Am Tor *G4* kann die Impulsfolge gestoppt bzw. eine definierte Impulszahl erzeugt werden.

Dem astabilen ist ein monostabiler Multivibrator (Zeitglied) zur Impulsdauerbegrenzung und Herstellung eines Tastverhältnisses $t_p{:}\tau \approx 1{:}5$ nachgeschaltet [5.15] [5.16] [5.25]. Sie unterscheiden sich in den Impulsbreiten (unabhängig vom Eingangsimpuls oder kleiner als dieser), der Arbeitsfrequenz und den Verzögerungszeiten. Einsatz des Schaltkreises D 121 vereinfacht die Ausführung.

Die Schaltung nach Bild 5.39 ist für Impulse von $t_p \approx 50$ ns bis 1 µs geeignet, wobei Eingangsimpulsbreite > Ausgangsimpulsbreite ist. Die Werte von *R2* und *C* des Integriergliedes können nicht beliebig gesteigert werden (s. Abschn. 4.4.2.; 47 $\Omega \leqq R2 \leqq 240\ \Omega$).

Die Diode *Gr* beeinflußt das L-Signal an *G6/3* (bei $\Delta U_S = 0{,}5$ V wird ΔU_{OH} nur 0,08 V).

Die Begrenzung der Taktimpulsdauer t_p erhöht die Einschwingzeit und somit die Kettenlänge. Mit dem A-Takt wird Übernahme, Setzen und Zählen, mit dem B-Takt Nullen, Koinzidenzauswertung, Speichern für Ausdrucken gesteuert.

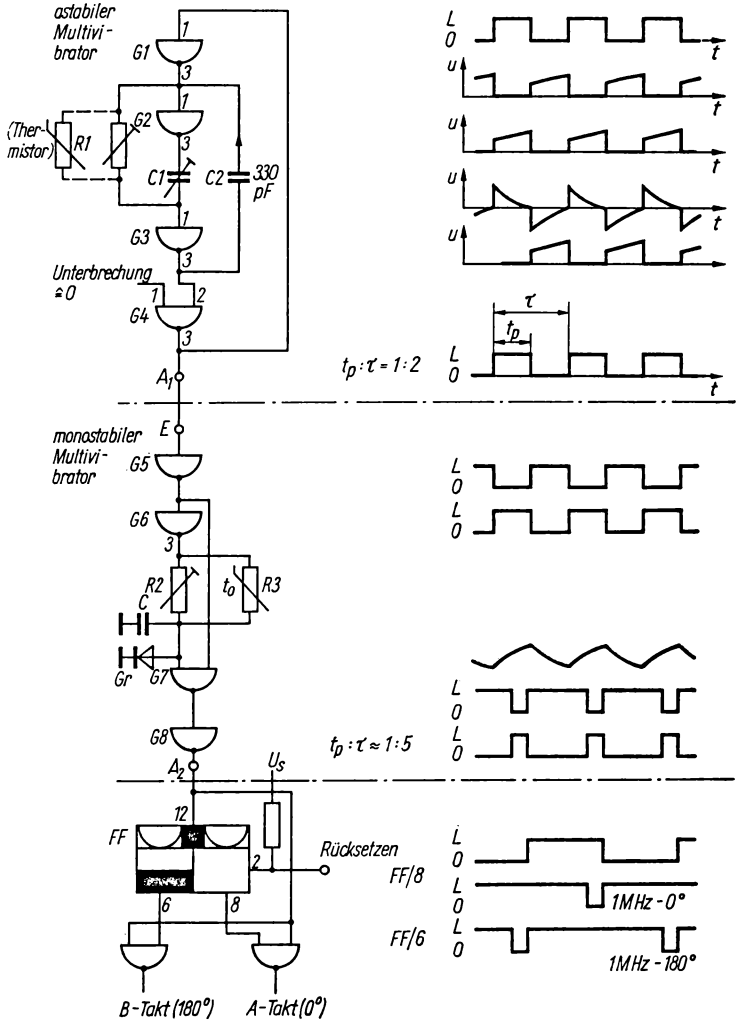


Bild 5.39. Taktversorgung, unstabilisiert (NC 410)

5.5.3. Taktversorgung, quarzstabilisiert

Für Taktversorgungen höherer Ansprüche mit genau definierter Frequenz ist die Stabilisierung mit einem Quarz nötig. Das ist dann geboten, wenn unmittelbar Vorschubgeschwindigkeiten abgeleitet bzw. die Kettenlänge zwischen zwei Speichern voll ausgenutzt werden sollen.

Die Arbeitsweise des Quarzes beruht auf der Piezoelektrizität (Deformation durch ein elektrisches Feld) und somit Anregung zu Schwingungen, die im Resonanzfall die höchste Amplitude aufweisen und besonders stark auf den elektrischen Schwingkreis zurückwirken [5.26]. Daten s. TGL 11759 und TGL 11769.

Werden sehr hohe Forderungen an die Frequenzstabilität gestellt, ist der Quarz in einer Oszillatorschaltung einzusetzen, die sinusförmige Spannung abgibt.

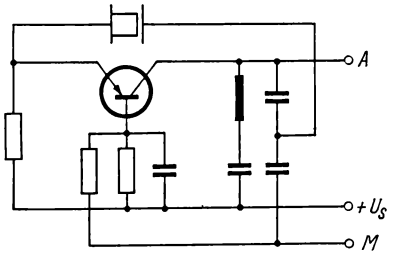


Bild 5.40. Oszillator

Die Schaltung nach Bild 5.40 arbeitet mit einer Rückführung des Kollektors über den Reihenresonanzwiderstand des Quarzes auf den Emitter und ist bis in den MHz-Bereich verwendbar. In der anschließenden Impulsformerstufe und einem Zeitglied wird wie oben das Tastverhältnis $t_p:\tau \approx 1:5$ erzeugt. Schwingkreise mit Quarzkristallen halten relative Frequenzabweichungen von 10^{-5} bis 10^{-9} ein.

Eine Reihenschaltung gegengekoppelter NAND-Glieder nach Bild 5.41 [5.27] verwendet die Rückführung des Ausgangssignals über einen Schwingquarz. Die Schaltung ist ab $U_S = 3$ V schwingfähig und weist eine Frequenzabweichung $|\Delta f| \leqq 200 \cdot 10^{-6}$ Hz auf.

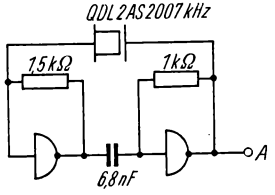


Bild 5.41. Astabiler Multivibrator mit NAND-Gattern

Astabile Multivibratoren mit Quarzreihenresonanz gestatten einstellbare Frequenz bei nicht extremer Konstanzforderung (Frequenztoleranz 10^{-3} [5.28]). Sie entsprechen im Grundprinzip der allgemein bekannten symmetrischen Schaltung mit *C2* statt *Q* nach Bild 5.42.

Zur Arbeitsweise der Kippstufe nur wenige Worte.

Annahme, daß *T1* gerade leitend wird, ergibt $A1 \rightarrow 0$. Damit senkt *C2* an der Basis von *T2* wegen seiner Ladung schnell die Spannung, und *T2* wird gesperrt, $A2 \rightarrow$ L. Über *C1* wird auf die Basis von *T1* rückgekoppelt, *T1* schaltet voll durch. Jetzt lädt sich *C2* über *R2*, *R6*, *R7* um, Basis von *T2* wird positiver und *T2* langsam durchgesteuert. Damit ist der Ausgangszustand obiger Annahme für *T2* erreicht und die Schaltung kippt laufend (astabil). Die Frequenz ist über *R7* einstellbar. Die Kollektorwiderstände *R1* und *R4* werden durch Dioden *Gr* vom Umladevorgang getrennt, wodurch dieser nicht an den Ausgängen wirksam wird.

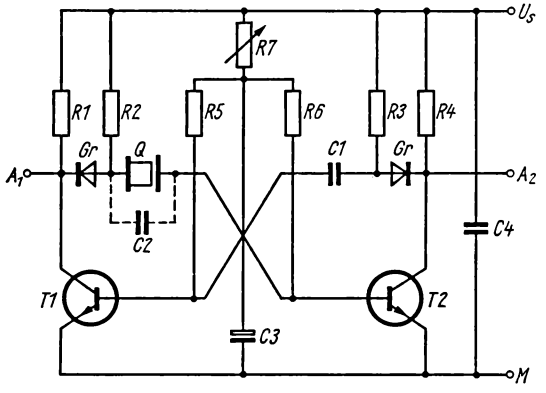


Bild 5.42. Einstellbarer astabiler Oszillator

Die *R-C*-Beschaltung ($C3 \cdot R7 = T_{37}$) dient der Anschwingsicherheit. Beim verzögerten Anstieg der Basisspannung U_{BE} wird durch Unsymmetrie ein Transistorkreis früher leitend als der andere, und die Annahme zum Schwingeinsatz ist erfüllt.

5.6. Funktionseinheiten für inkrementale innere Datenverarbeitung, Positionierfunktionen

5.6.1. Korrekturimpulseinblendung

Der Zählimpulsfolge (i_Z) aus dem Richtungsdiskriminator eines ersten Gebers lassen sich Korrekturimpulse eines zweiten (i_K) überlagern, um Fehler der Maßverkörperung zu korrigieren oder mechanische Ungenauigkeiten elektronisch auszugleichen bzw. um Summen oder Differenzen zu bilden.

Mit *JK*-FF wird der einlaufende Impuls mit dem Takt synchronisiert und auf eine Taktperiode begrenzt. Der Richtungsaufruf bleibt auch nach Abarbeitung erhalten und ist bei Bedarf umzuspeichern. Die Schaltung bewirkt die vorzeichenrichtige Summation $i = i_Z + i_K$.

Die Summation wird über einen Vergleich ausgeführt, der synchrone, entgegengesetzte Impulse auslöscht, gleichsinnige addiert (Bild 5.43).

Der vereinfachte Stromlaufplan zeigt folgendes:
Der Ausgang *G1/6* hat 0-Signal bei gleicher Impulsrichtung, er ist bei nur einem Impuls wegen des weiter anstehenden Richtungsaufrufs nach Impulsabarbeitung

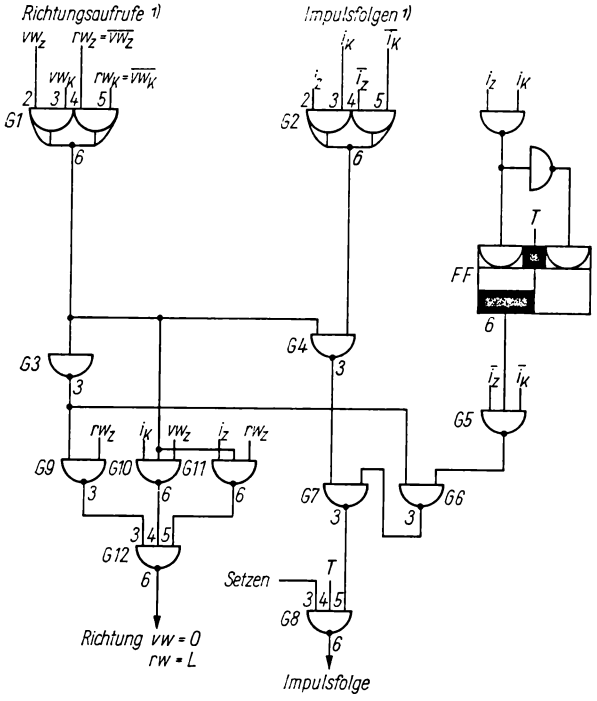


Bild 5.43. Korrekturimpulseinblendung

[1]) Signale stehen an der L-0-Flanke des Taktes an

undefiniert. Von ihm wird bei zwei Impulsen gleicher Richtung *G6* aufgerufen. Der Ausgang *G2/6* hat 0-Signal bei keinem oder zwei Impulsen, das Gatter verarbeitet den Einzelimpuls, während ein Doppelimpuls ($i_Z + i_K$) vom FF erfaßt wird. Es verlängert bei zwei synchronen Impulsen den Aufruf von *G8* von einer auf zwei Taktbreiten, läßt die Impulse also quasiseriell abarbeiten, indem an *G8/6* zwei Impulse an den Zähler gegeben werden. *G5* gibt beim Doppelimpuls *G6* frei. Es ruft außerdem bei einem Impuls, ohne daß FF angesprochen hat, *G6* auf, wodurch entweder über *G3* → *G6* oder *G4* → *G7* angeregt werden und die oben erwähnte undefinierte Lage von *G1* beseitigt wird. Die Richtung wird an *G12* ausgegeben. Wegen der vier möglichen Einzelimpulse ($\pm i_Z$; $\pm i_K$) und der vier möglichen Kombinationen ($\pm i_Z + (\pm i_K)$) verbietet sich die Wiedergabe aller Taktdiagramme.
Stellvertretend zeigt Bild 5.44 eine der möglichen Kombinationen.

5.6.2. Nulldurchgangslogik

Die Quadrantensteuerung nach Bild 5.45 hat die Aufgabe, beim Erreichen der Zahl 0 (und Beibehaltung der Zählrichtung) das Vorzeichen und die Zählweise des

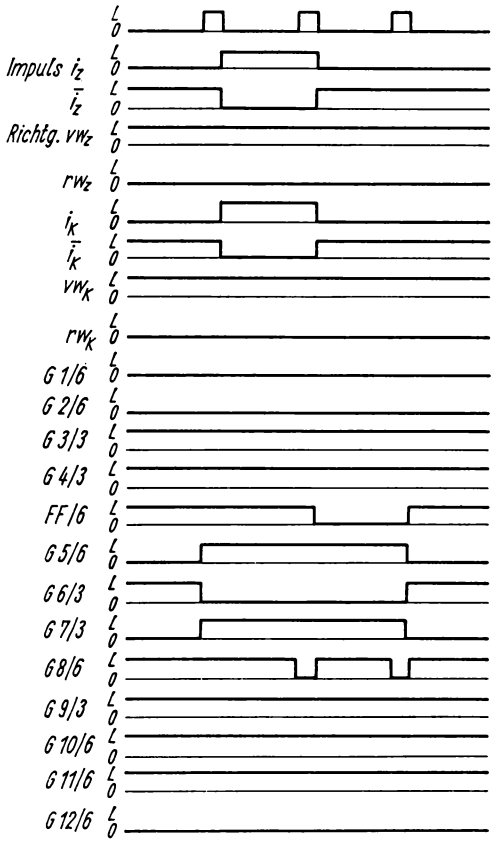


Bild 5.44. Taktdiagramm. Zähl- und Korrekturimpuls vorwärts

Zählers umzuschalten. Damit erhält man die Zahlenfolge

$$\cdots + 2, + 1, \pm 0, - 1, - 2 \cdots$$

Ohne Umschaltung würde in allen Ziffern von 0 auf 9 gesprungen.

Das FF wird kippen, sobald der Hauptzähler Null erreicht hat (und nur dann!) und die Zählrichtung erhalten bleibt, also ein Quadrantenwechsel eintritt (Aufruf *G5/3* = L). Die Umschaltung bei NC 410 erfolgt im *B*-Takt, so daß gewechselt ist, ehe der nächste Impuls verarbeitet wird. Mit dem Vorzeichenwechsel durch Ansprechen des FF ist auch die Zählrichtung des Zählers (*G1* bis *G3*) umzuschalten, da im negativen Bereich Rückwärtsimpulse ebenfalls eine steigende, absolute Zahlenfolge bewirken.

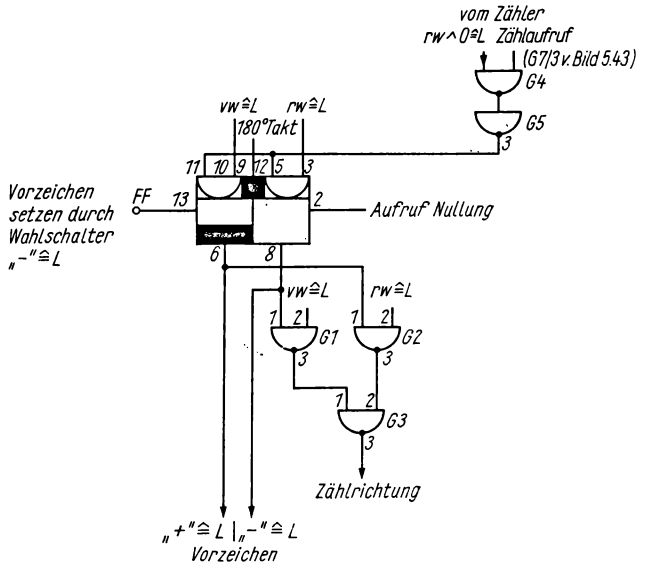


Bild 5.45. Vorzeichen- und Zählrichtungswechsel beim Nulldurchgang

5.6.3. BCD-Zähler

Prinzipiell können für die inkrementale Verarbeitung duale oder tetradische Vorwärts-Rückwärts-Zähler verwendet werden. Bei letzteren kann der Zählerinhalt einfach dezimal angezeigt werden (NC 410). Die bei NC geforderte Zählfrequenz (Berechnung s. nachfolgend) verlangt einen Parallelzähler, bei dem mit jedem Zähltakt das richtige Ergebnis ansteht.

Der BCD-Zähler nach Bild 5.46 erfüllt folgende Aufgaben:

- Nullung jeder Ziffer
- Voreinstellung der Dualziffern jeder Tetrade von außen
- Aufsummieren der einlaufenden Impulse
- Verwirklichung der Zählrichtung
- Verhindern von Pseudotetraden.

Genullt wird von Hand oder automatisch und unmittelbar vor jedem Setzen (*G1*).

Die Voreinstellung erfolgt durch Aufruf der Vorwahlschalter über einen synchronisierten Tasterimpuls ($S = 0 \rightarrow Q =$ L).Während des Setzens sind Zählimpulse gesperrt, eine gespeicherte Koinzidenz wird aufgehoben.

Die Gesetzmäßigkeit für Parallelzähler leitet sich wie folgt ab:

Vorwärtszählung

- Stelle 1 $\triangleq 2^0$ kippt mit jedem in die Tetrade einlaufenden Impuls
- Stelle k wird bei einem Zählimpuls gekippt, wenn alle Stellen 1 bis k — 1 L-Signal aufweisen (Ausgang $Q \triangleq$ L).

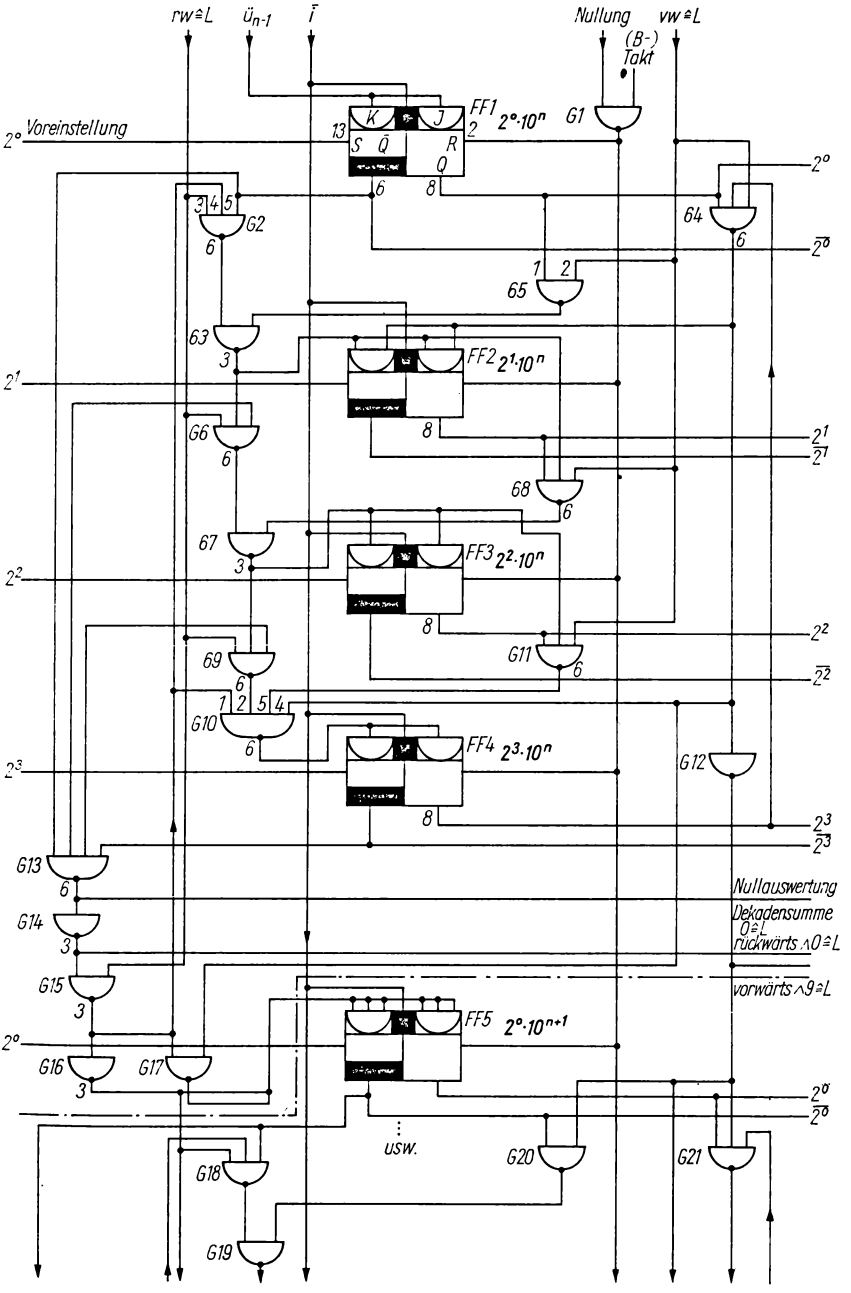


Bild 5.46. VR-BCD-Zähler

Bemerkung: Diese beiden Bedingungen sind für Dualzähler ebenfalls gültig und hinreichend.

- Beim Erreichen der Ziffer 9 (L 0 0 L) sind beim nächsten Impuls die Speicher 2^0 und 2^3 auf Null zurückzustellen, und gleichzeitig ist ein Übertragsimpuls in die nächsthöhere Dekade abzusetzen.

Rückwärtszählung

- Stelle 1 $\triangleq 2^0$ kippt mit jedem in die Tetrade einlaufenden Impuls
- Stelle k wird bei einem Zählimpuls gekippt, wenn alle Stellen 1 bis $k-1$ 0-Signal aufweisen.

Bemerkung wie oben.

- Beim Erreichen der Ziffer 0 sind beim nächsten Impuls die Speicher 2^0 und 2^3 auf L zu stellen, und gleichzeitig ist ein Übertragsimpuls in die nächsthöhere Dekade abzusetzen.

Da die Speicherstelle $2^0 \cdot 10^0$ mit jedem Zählimpuls unabhängig von der Richtung kippt, wird der Übertragseingang an L gelegt.

Vorwärtsrichtung

Die Rückwärtssperre bewirken *G2*, *G6*, *G9* (Ausg. = L). Nach dem Kippen des *FF1* werden über *G3* und *G4* (wegen *FF4/8* = 0) die *JK*-Eingänge von *FF2* aufgerufen. Der nächste Impuls kippt *FF2*, dessen Frequenz gemäß der dualen Zahlenfolge halb so groß wie die von *FF1* ist.

G8 gibt bei *FF1* und *FF2/8* = L *FF3* frei, *FF1* bis *FF3* schalten gemeinsam (L00 $\triangleq$ 4). *FF3* wird dabei von *FF2/8* = 0 wieder gesperrt und verharrt bis LLL in L-Stellung. *G11/6* aktiviert *FF4*, wodurch beim nächsten Zählimpuls *FF1* bis *FF4* schalten (L000).

Beim Erreichen von L00L wird mit *G4/6* = 0 *FF2* gesperrt und *FF4* aufgerufen, und der nächste Impuls schaltet *FF1/8* = 0 (*FF3* ist durch *FF2* gesperrt) und *FF4/8* = 0 ($\triangleq$ 0000). Über *G17* und *G12* geht der Übertrag (Impuls und Richtung) an die nächste analog aufgebaute Dekade.

Rückwärtsrichtung

Die rechte Seite ist wirkungslos. Das Kippen der FF wird über die Gatter *G2*, *G6*, *G9* gesteuert. Bei der Ziffer 9 (L00L) ist *FF1/6* = 0, und *FF2* bis *FF4* sind nicht aufgerufen (Ausgänge *G3*, *6*, *9* = 0). Der nächste Takt kippt nur *FF1* zu L000. Jetzt hat *FF1/6* auch L, und *FF2* bis *FF4* sind aufgerufen ($\rightarrow$ 0LLL) usw. Beim Erreichen von 0000 haben alle *FF6* = L und *G13/6* = L. *G15/3* = L ruft den Übertrag, die Richtung und *FF4* auf und sperrt *FF2* und *FF3*. Der nächste Impuls kippt von 0000 auf L00L und gibt einen Rückwärtsimpuls auf Dekade 10^{n+1}.

An *G16/3* steht das logische Produkt aller Tetradenziffern (2^0 bis $2^3 = 0$) $\wedge$ (rückwärts) $\triangleq$ L zur Verfügung, das am Ausgang der höchsten Tetrade „Zähler $\equiv 0 \wedge$ rw" bedeutet und die Nulldurchgangslogik sowie die Koinzidenz schaltet.

Bei einer Taktbreite von (90 + 15%) ns = 103,5 ns und einer Verzögerungszeit durch 2 Gatter/Dekade · 7 Dekaden = 14 Gatter sowie 4 Gatter und ein FF für die Quadrantenumschaltung von $\leqq 18 \cdot 13 + 50 = 284$ ns ergibt sich eine theoretische Zählfrequenz von

$$f = \frac{1}{t_V} = \frac{1}{284 + 103{,}5} = 2{,}57 \text{ MHz},$$

die sich durch Leitungsverzögerung (< 5 ns) und Sicherheitsbetrag verringert.

Der Zähler wird durch eine Zusatzschaltung zum schiebenden VR-Zähler, der auch als Schieberegister zu verwenden ist (Bild 5.47).

Alle FF erhalten 2 Gatter (*G50* ff) vorgeschaltet, die das Schieben bewirken. Beim Schiebeaufruf wirkt ein an E bzw. *FF*-Ausgang Q anstehendes L-Signal auf $FF/4 = \mathrm{L}$. Die Übertragseingänge erhalten log. L. Die „L" wird mit dem Taktaufruf eingeschoben.

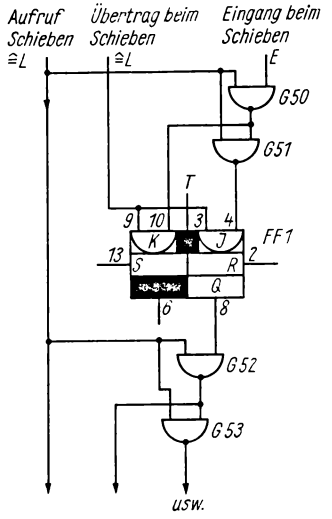


Bild 5.47. Schiebezusatz für VR-Zähler nach Bild 5.46

Steht am Informationseingang $E = 0$ bzw. am FF-Ausgang $Q = 0$, wird diese 0 durch $FF1/10 = \mathrm{L}$ ($K = \mathrm{L}$) ebenfalls zum nächsten FF weitergeschoben. Verbindet man Ausgang 2^3 mit dem Informationseingang, entsteht ein Ring.

5.6.4. Vorabschaltung, Koinzidenz

Für Positionierabläufe bei inkrementaler Verarbeitung wird der Zähler mit der zu verfahrenden Strecke als Vielfaches des Inkrements über die Sollwertvorgabe voreingestellt und gegen Null herausgezählt. Damit werden Vorabschaltwerte zur Verminderung des Vorschubs und die Koinzidenz bei Annäherung an die Sollposition vom Zählerinhalt abgeleitet. Bei den üblichen kleinen Vorschubgeschwindigkeiten steht der Zählerwert Null viele Takte lang an und wird mehrfach ausgewertet. Überfahren der Position ist damit ausgeschlossen.

Die Vorabschaltwerte werden in Brückenmatrizen (Bild 5.48) durch Einlöten abhängig von der Dynamik der Maschine festgelegt:

$0\,0\,0\,0 \rightarrow 0 =$ Nullauswertung

$0\,0\,0\,\mathrm{L} \rightarrow 1 = \overline{2^3}\,\overline{2^2}\,\overline{2^1}$

$0\,0\,\mathrm{L}\,0 \rightarrow 2 = \overline{2^3}\,\overline{2^2}\,2^1 \vee \overline{2^3}\,2^2\,\overline{2^0}$

$0\,0\,\mathrm{L}\,\mathrm{L} \rightarrow 3 = \overline{2^3}\,2^2$

$0\,L\,0\,0 \rightarrow 4 = \overline{2^3}\,\overline{2^2} \vee \overline{2^3}\,\overline{2^1}\,\overline{2^0}$

$0\,L\,0\,L \rightarrow 5 = \overline{2^3}\,\overline{2^2} \vee \overline{2^3}\,\overline{2^1}$

$0\,L\,L\,0 \rightarrow 6 = \overline{2^3}\,\overline{2^2} \vee \overline{2^3}\,\overline{2^1} \vee \overline{2^3}\,\overline{2^0}$

$0\,L\,L\,L \rightarrow 7 = \overline{2^3}$

$L\,0\,0\,0 \rightarrow 8 = \overline{2^3} \vee 2^3\,\overline{2^0}$

$L\,0\,0\,L \rightarrow 9 = L$ oder $2^3 \vee \overline{2^3}$

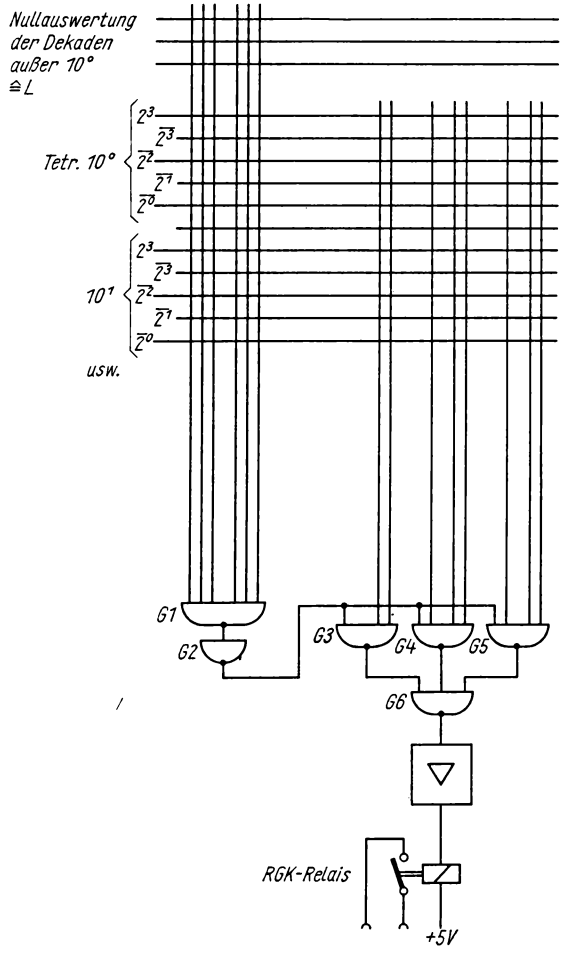


Bild 5.48. Vorabschaltmatrix (NC 410)

Aus Sicherheitsgründen gegen Überfahren wird stets der Bereich 0 bis K, wenn K die gewünschte Ziffer ist, ausgewertet (z.B. Ziffer 6: Bereich 0 bis $3 = \overline{2^3}\,\overline{2^2}$; 4 bis $5 = \overline{2^3}\,\overline{2^1}$; $6 = \overline{2^3}\,\overline{2^0}$).

An *G1* werden die Nullauswertungen der höheren Dekaden geschaltet, unbelegte Eingänge erhalten L. Der gewünschte Vorabschaltwert wird in *G3* bis *G5* realisiert und wird erst wirksam, wenn die höheren Dekaden auf Null zurückgezählt sind.

5.7. Funktionseinheiten für absolute innere Datenverarbeitung, Positionierfunktionen

5.7.1. Steuerwerk

Im Steuerwerk einer absoluten Steuerung (NC 470) werden die Abläufe des sich wiederholenden internen Rechenzyklus durch ein Taktdiagramm gesteuert. Absolute Steuerungen können entweder dual oder dezimal orientiert sein. Der duale Aufbau gestattet zwar eine einfache interne Verrechnung ohne 6-Korrektur, birgt aber entweder den Nachteil der Konvertierung der dekadisch anstehenden Meßwerte und der Ergebnisse zur dekadischen Anzeige in sich, oder ein rotatorischer Meßwertgeber mit dualer Codierung benötigt Spindeln mit 10,24 mm Steigung, die Decodierung zur Anzeige bleibt.

Tetradische Verarbeitung verläuft dagegen einheitlich vom Messen, der Dateneingabe bis zur Ausgabe, wobei sowohl die Tetraden als auch innerhalb der Tetrade die Ziffern bei hoher Taktfrequenz seriell bei NC 470 im Gegensatz zum Vorläufer BNC 3 verarbeitet werden (Serien-Serien-Rechner).

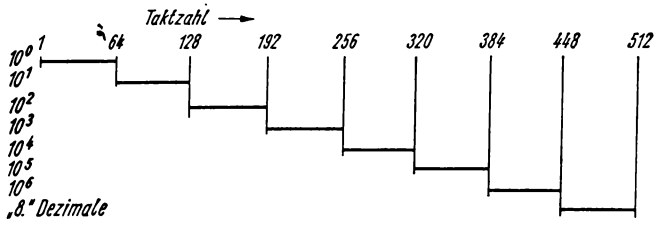


Bild 5.49. Rechenzyklus, grob, für eine Achse

Der Rechenzyklus besteht nach Bild 5.49 aus 7×1 Dezimalen zu je 64 Takten. Die für eine Tetrade zur Verfügung stehenden 64 Takte dienen gemäß Bild 5.50 bei 10^0 bis 10^6 der Verrechnung folgender 8 Werte je 8 Takte:

- Festwert F
- Festwerttransformation FT
- Korrekturwert 1 — $K1$ (Werkzeugkorrektur) } Vierseitenbearbeitung
- Korrekturwert 2 — $K2$ (Lagekorrektur) }
- Sollwert — S
- Korrekturwert 3 — $K3$ (Lagekorrektur, Dopplung beim Drehen)
- Istwert — I
- Vorabschaltwert — V.

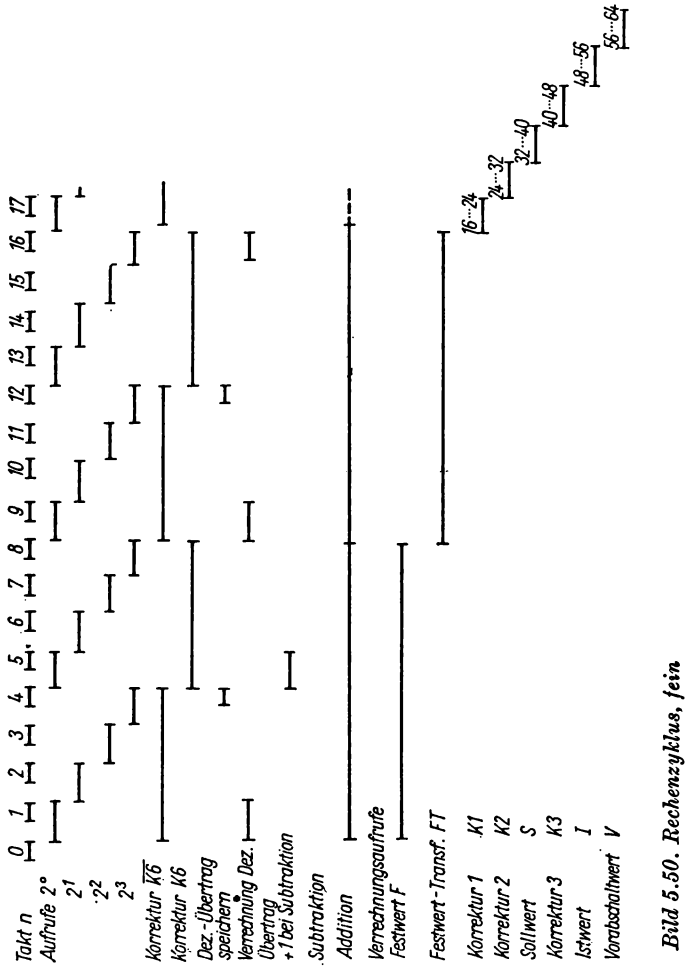


Bild 5.50. Rechenzyklus, fein

Die 8 Takte je Wert teilen sich weiter in 4 Takte für die Addition $A + B +$ Übertrag der Ziffern 2^0 bis 2^3 und 4 Takte für die Korrektur mit 6 (*K6*). Rechenalgorithmus s. Gl. (5.6), S. 183.

Die 512 Takte des Gesamtzyklus werden einem 9stelligen Dualzähler (2^9=512) nach Bild 5.51, dem Operationszähler, entnommen.

Aus dem Taktdiagramm sind leicht die kombinatorischen Verknüpfungen mit der Zählerstellung abzuleiten, z.B. für die Tetradenziffern 2^0 bis 2^3 die Kombination *FF1* und *FF2*, für die Korrektur *K6 FF3*.
Dezimalen Übertrag speichern: $2^3 \cdot \overline{K6}$ usw.

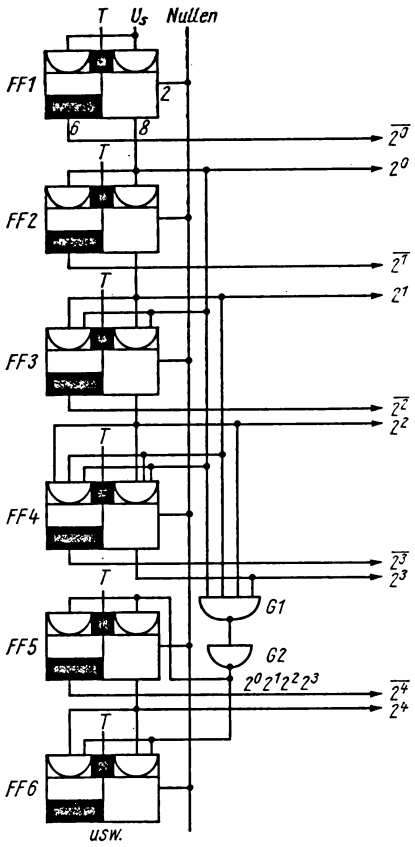


Bild 5.51. Dualer Vorwärtszähler (Operationszähler)

Trennt man den Zähler auf, indem man für die Teilzähler lediglich die Frequenz der Eingangsimpulse mit $1/2^m$ reduziert (Frequenzteiler), entsteht Bild 5.52.

Da bei der 6-Korrektur der vorher mit dem Registerinhalt verrechnete Wert nicht mehr anstehen darf, wird sein Aufruf mit $\overline{K6}$ konjunktiv verbunden.

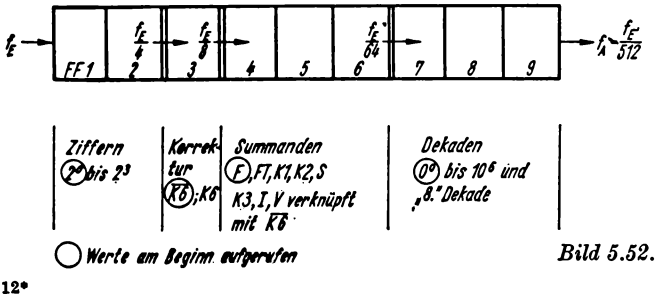


Bild 5.52. Operationszähler

Zur Umschaltung auf die beiden möglichen simultanen Achsgruppen und Verdopplung zur Ziffernanzeige ist ein 2-bit-Zähler mit nachfolgender $\binom{4}{1}$-Entschlüsselung vorhanden, der im Takt 512 weiterschaltet. Nach 2048 Takten beginnt der Gesamtzyklus von vorn.

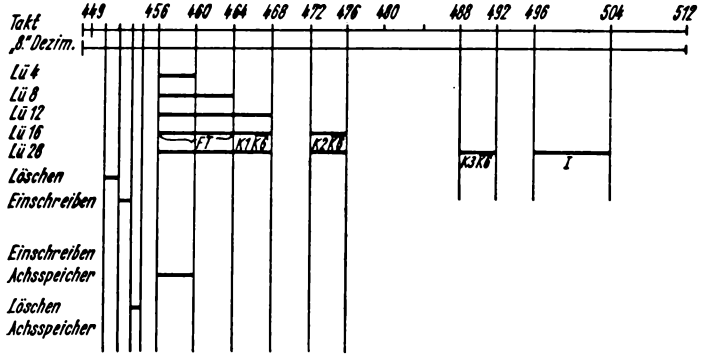


Bild 5.53. Taktdiagramm „8." Dezimale

In der „8." Dezimale wird der Übertrag verarbeitet und der Eingabetaktzyklus (ETZ) gebildet, wobei die Verknüpfungen mit den Summandenaufrufen nur Zeitbezüge darstellen (Bild 5.53). So ist z.B. ein ETZ mit 16 Takten (Leserübernahmezyklus Lü 16) $(FT \vee K1 \cdot \overline{K6} \vee K2 \cdot \overline{K6}) \cdot$„8". Die Zeitschachtelung der Positionierrechnungen 10^0 bis 10^6 mit der Eingabe in der „8." Dezimale gestattet gleichzeitiges Positionieren und Einlesen in die Pufferspeicher. Bei einer Grundtaktfrequenz von beispielsweise 1,5 MHz wird ein vollständiger Zyklus in

$$2048 \frac{1}{1{,}5 \cdot 10^6}\,\mathrm{s} = 1{,}36\ \mathrm{ms}$$

absolviert, d.h., es vergeht eine Totzeit von 1,36 ms zwischen den Führungsgrößen einer Achse. Bei einem Vorschub von 1 m/min beträgt die unkontrollierte Wegstrecke (Blindfahrt) dabei nur 22,6 µm. Dieser Wert ist wegen der sowieso nötigen Geschwindigkeitsverringerung vor der Koinzidenz selbst dann unkritisch, wenn erst der zweite Zyklus (s. Abschn. 2.4.5.3.) das richtige Ergebnis liefert.

5.7.2. Rechenwerk

Kern aller absoluten Steuerungen ist das Addier-Subtrahier-Werk (englisch adder).

In der NC 470 wird die Addition seriell modulo 16 nach Abschn. 2.4.5.3. ausgeführt. Damit besteht das Rechenwerk nur aus einem Volladder (s. Bild 2.10, S. 34) mit entsprechenden Übertragsspeichern und Registern.

Bei Subtraktion $A - B$ gilt für die Tetradenziffer $2^0 \cdot 10^0$:

$$a_0 - b_0 = a_0 + \overline{b}_0 + 1;\ \overline{b} = (B - 1)\text{-Komplement} \qquad (5.5)$$

für alle anderen Ziffern: $a_i - b_i = a_i + \overline{b}_i + c_i \quad i \in \{1, 2, 3\}$,
so daß die Additionsgrundschaltung erhalten bleibt.

Im Bild 5.54 ist schematisch die gesamte Rechnerbaugruppe dargestellt. Über *G1* bis *G3* wird der zum Registerinhalt A zu addierende Summand B vorbereitet. Parallel anstehende Tetradenziffern 2^0 bis 2^3 werden seriell aufgerufen. Seriell erfolgt die Eingabe in *G3* aus Registern, Diodenmatrizen, vom Istwert usw. In *G1*, *G2* wird auch die Korrektur „6" eingespeist.

Mit *G4* wird die Konvertierung von B bei Subtraktion vorgenommen, *G6* speist am Übertragseingang $+1$ ein. Die Partialsummen der Tetradenziffern s_i werden im Rechenregister *RR* gespeichert und mit jedem Takt geschoben. Am Ende des 4. Rechentaktes steht am Ausgang des Registers s_0, am Eingang s_3.

Dieses Register bewahrt stets die Teilsumme der bisherigen Rechnungen auf, z.B. von einer Dezimale 10^k die Summen $F + FT + K1 + K2 + \ldots$ nach Gl. (5.6), s. S. 183. Beim Rechenablauf ohne Korrektur (4 Takte $\overline{K6}$) wird über *G14* der Registerinhalt, beginnend mit 2^0, als Summand A in den Adder eingeschoben. Mit Beginn der Verrechnung einer neuen Dekade wird mit *G5* die Eingabe des im Rechenregister stehenden Wertes aus der vorherigen Dekade verhindert. Vorgabe $A = 0$, $0 + F = F$.

Das *ÜR* speichert alle Dezimalenüberträge $\ddot{u}_n$ nach jeweils 64 Takten.

Die Bedingungen für einen Dezimalenübertrag $\ddot{u}_n$, $n \in \{0, 1, 2, 3, 4, 5, (6)\}$, lauten nach Abschn. 2.4.5.3. (Rechnung $\overline{K6}$):

$A + B > 9$

- Pseudotetrade, ermittelt durch $2^3 \cdot (2^2 \vee 2^1)$ vor dem 4.Takt an den Expandern zu *G13* $\rightarrow \ddot{u}_n$
- Endübertrag $\ddot{u}_n = c_3$ bei $A + B > 15$ (*G13*)

$A - B < 0$

- kein Endübertrag (z.B. entsteht bei $1-8 = -7$ keine Pseudotetrade!) $\bar{\ddot{u}}_n = \bar{c}_3$ Dezimalenübertrag ist hier Mangel, wodurch die $+1$ des 16-Komplements unterdrückt wird.

Die Einspeicherung erfolgt im 4. Takt der Grundrechnung $\overline{K6}$, dagegen erfolgt kein Einspeichern bei *K6*. Ein gespeicherter Dezimalübertrag löst im Korrekturzyklus *K6* über *G17/3* = L bei Addition $+6 =$ 0LL0 und bei Subtraktion $-6 =$ L00L + L als Summand B aus.

Beispiel:

Rechenzyklus 1

7	7	0 L L L	
− 9	+ 6	0 L L 0	
	+ 1	0 0 0 L	
		L L L	
	14	L L L 0	kein Endübertrag $c_3 \rightarrow$ Dezimalenübertrag $\ddot{u}_n$
	9	L 0 0 L	Korrektur
	1	0 0 0 L	
		L L L L	
	24	L. L 0 0 0	konegative Differenz

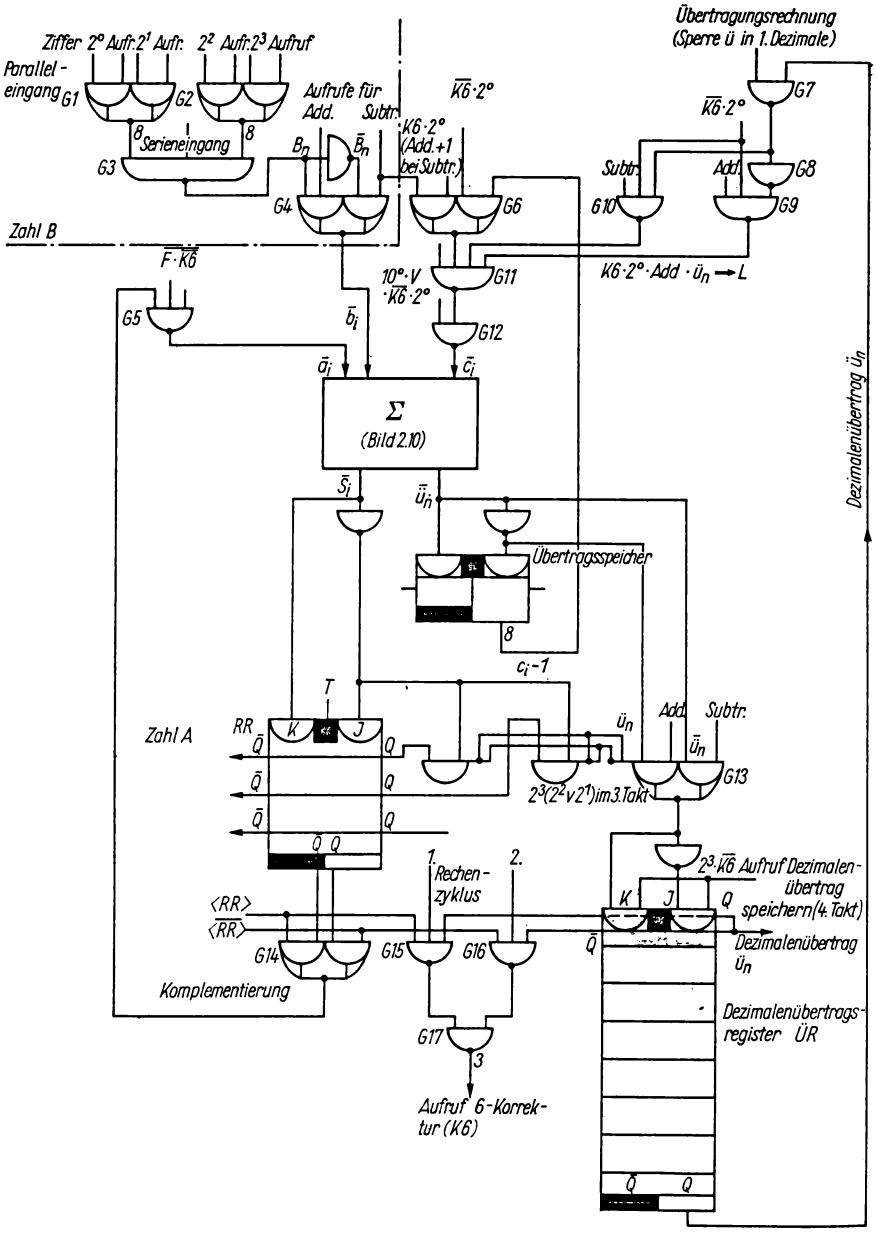


Bild 5.54. Serieller Rechner

Für den Rechenzyklus 2 zur Beseitigung der konegativen Differenz ist der Korrekturaufruf entgegengesetzt (*G16*), indem $\ddot{u}_n$ eine Korrektur auslöst. (Die konegative Summe, im Beispiel 14, wird durch Komplementierung stets < 9!)

7 |	7	0 L L L	
− 9 |	+ 6	0 L L 0	
	+ 0	0 0 0 0	(oder 000L bei höherer Tetrade)
		L L	
	13	0. L L 0 L	kein Endübertrag c_3 → Dezimalenübertrag $\ddot{u}_n$
	2	0. 0 0 L 0	15-Komplement
		L L L L	keine Korrektur
		0 0 0 L	
		L L L L	
	− 2	L. 0 0 L 0	

Der Rechenzyklus 2 wird bei Vorhandensein des Endübertrags $\ddot{u}_7$ im Richtungsspeicher [Δ 1 nach Gl. (5.6)] im nächsten Durchlauf eingeleitet. Verschwindet er, gilt wieder Rechenzyklus 1.

Der Dezimalenübertrag $\ddot{u}_n$ wird in der Dezimale $n + 1$ an gleicher Stelle verrechnet, wodurch er abhängig vom Vorzeichen des Summanden als Überschuß oder Mangel eingeht.

G7 sperrt den Übertrag falscher Werte früherer Rechnungen bei Verrechnung der 1. Dezimale. In *G9* wird bei Addition bei Ziffer 2^0 der Übertrag $\ddot{u}_{n-1} = c$ eingeleitet, in *G10* dagegen bei Subtraktion bei keinem Übertrag eine 1 eingeschrieben. (Der Mangelübertrag hebt sich mit der $+1$ zur Ergänzung des 15-Komplements zum 16-Komplement auf, s. Beispiel im Abschn. 2.4.5.3.) Schließlich wird in *G6* bei Sub · *K6* · 2^0 stets zur Ziffer 2^0 eine 1 addiert und der Tetradenziffernübertrag c_0 bei *K6* · 2^0 gesperrt, wenn dieser von der vorherigen Rechnung als c_3 noch ansteht.

An *G12* wird eine 1 subtrahiert, um gemäß Gl. (5.6) $-(V + 1)$ zu erhalten. Der Rechenalgorithmus lautet (Bild 5.55):

$$|\underbrace{(F + FT + K1 + K2 + S + K3) - I}_{\Delta 1}| - (Vi + 1) = \Delta 2. \qquad (5.6)$$

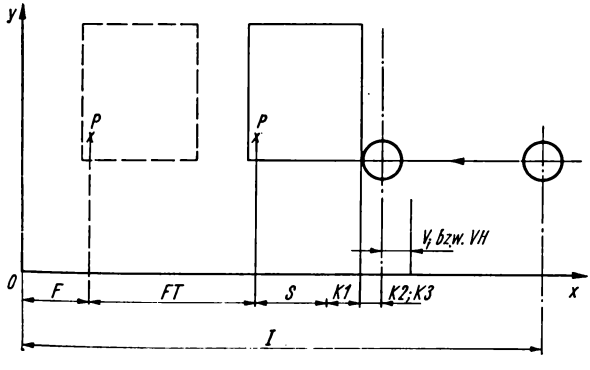


Bild 5.55. Geometrie der zu verrechnenden Werte

F, I und V sind absolute, FT, $K1$, $K2$, S, $K3$ relative Zahlen. Der Rechenzyklus 1 mit einem konegativen Ergebnis ($\Delta 1 < 0$) ergibt für 1,36 ms einen falschen Absolutwert, der durch die Trägheit nachgeschalteter mechanischer Glieder unwirksam bleibt.

Beispiel der kolonnenweisen Verrechnung:

		$\ddot{u}_2$	$\ddot{u}_1$	$\ddot{u}_0$		
			0	0	0	
F	$= +\ 90$		0	9	0	
		0	0	0 9	0	0
FT	$=\ 0$		0	0		0
		0	0	0 9	0	0
$K1$	$= -\ 25$		-0	-2		-5
($K2$ ausgelassen!)		0	0	0 $6^{\curvearrowleft -1}$		5
S	$= +\ 290$		2	9		0
		0	$3^{\curvearrowleft +1}$	5	0	5
$K3$	$= +\ 18$		0	1		8
	373	0	3	0 $7^{\curvearrowleft +1}$		3
I	$= -\ 480$		-4	-8		-0
	$-\ 107$					
Σ	$=\lvert -107\rvert$	-1	$8^{\curvearrowleft -1}$	9 0		3
$-(Vi+1)$	$= -\ 11$	neg.	0	1		1
	$(-)\ 96$	Zahl komplementiere! $\Rightarrow$	($9^{\curvearrowleft +1}$	0 0		4)

2. Zyklus mit Komplementierung		
3	7	3
-4	-8	-0
1	0	7 $\triangleq \overline{893}$
-0	1	1
-0	9	6

5.7.3. Vorschubgeschwindigkeit, Nebenkoinzidenz

In Abhängigkeit von der Sollwert-Istwert-Differenz werden die Bewegungsrichtung und im Abschaltkreis die gestuften Vorschubgeschwindigkeiten (Vorabschaltung) errechnet [Gl. (5.6), Bild 5.56]:

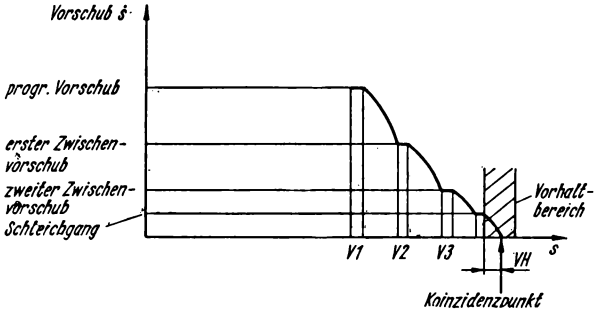


Bild 5.56 Vorabschaltung

$\Delta 1 > 0$ Vorschubrichtung positiv

< 0 Vorschubrichtung negativ

$= 0$ Hauptkoinzidenz erreicht.

Das Vorzeichen von $\Delta 2$, abhängig vom Vorabschaltwert $Vi + 1; i \in \{1, 2, 3\}$, bestimmt: $\Delta 2 \geqq 0$ Vorschub beibehalten
< 0 Vorschub reduzieren bzw. Halt.

Durch die Verrechnung $Vi + 1$ wird das Kriterium < 0 für die Geschwindigkeitsänderung unter Ausschalten des Gleichheitszeichens erreicht.

Nach Abschn. 5.7.2. ist bei negativer Differenz $\Delta 1\ \tilde{u}_7 = \mathrm{L}$ eingespeichert, von dem die Geschwindigkeitsausgabe mittels 3-bit-VR-Zählers nach Tafel 5.1 abgeleitet wird.

Tafel 5.1. Vorabschaltung

Zählerstellung	Aufgerufene Vorabschaltwerte an Matrix	Ausgegebene Vorschubgeschwindigkeit
$2^2 2^1 2^0$		
LLL	$V1 = 2^2\ \overline{V2}$	programmierter Wert
LL0		1. Zwischenvorschub $= 2^2\ (2^1 \not\equiv 2^0)$
L0L	$V2 = \overline{2^1}\ \overline{VH}$	
L00		2. Zwischenvorschub $= \overline{\text{Null}}\ (2^1 \equiv 2^0)$
0LL	$V3 = \overline{2^2}\ \overline{VH}$	
0L0		Schleichgang $= (2^1 \not\equiv 2^0)$
00L	$VH = \overline{2^1}\ \overline{2^2}$	
000		Halt

Ist der Abstand vom Koinzidenzpunkt größer als *V1*, wird der Zähler bis LLL hochgezählt. Die Rechnung läuft mit *V1* ab, die Vorschubgeschwindigkeit ist gleich der programmierten. Wird mit $V1\ \Delta 2 < 0$, erscheint ein Rückwärtszählimpuls, der den ersten Zwischenvorschub aufruft. (Ziffer LL0). Trotzdem wird zur Kontrolle nochmals mit *V1* gerechnet, wodurch ein weiterer Rückwärtsimpuls entstehen muß, der auf L0L schaltet und *V2* aufruft. Da die Rechnung mit $V2\ \Delta 2 > 0$ ergibt, schaltet der Zähler wieder auf LL0 und ruft *V1* auf, d.h., er pendelt zwischen L0L und LL0; der erste Zwischenvorschub bleibt aber erhalten. Erst bei $\Delta 2 < 0$ mit *V2* wird bei L00 und 0LL der zweite Zwischenvorschub eingelegt. So werden Zufälligkeiten (einmalige Fehlrechnungen) wegen der Trägheit der Vorschubreduzierung ausgeschaltet.

Auch zur Bildung des Koinzidenzsignals „Halt" sind zwei Rechnungen mit *VH* und $\Delta 2 < 0$ nötig.

Die achsbezogenen 3 Vorabschaltwerte werden in Matrizen fest, der Vorhaltwert an der Bedienblende bis 9 Inkremente eingestellt ($V3 > VH$).

Die Funktionseinheit „gestuftes Einfahren" unterdrückt durch analogen Vergleich die Vorabschaltwerte *Vi*, wenn ein niedrigerer Vorschub programmiert ist.

5.7.4. Festwert- und Korrekturwertverarbeitung (Unterprogramme G 45 bis G 59)

Die Aufrufe erfolgen gemäß Taktdiagramm (Bild 5.50). Die Festwerte F, in Vorwahlschaltern gespeichert, sind achsbezogen. Bei den Unterprogrammen G 54 bis G 59 (translatorische Verschiebungen x, y, z, xy, xz, yz) wird statt des Festwertes 1 der zweite Festwert (ebenfalls aus Vorwahlschaltern) wirksam.

Diese Arbeitsweise wird nötig, wenn

- 2 Werkstücke auf einem Tisch aufgespannt und wechselseitig bearbeitet werden
- 2 Supporte von einem Meßsystem gemessen werden.

Die über den Lochstreifen ermöglichte Festwerttransformation FT dient zusammen mit der Abschnittswiederholung zur Verschiebung von Bohrbildern und ähnlichem.

Die Korrektur $K1$ (Werkzeugkorrektur) ist bei Werkzeugwechseleinrichtungen anzuwenden. Zur Vermeidung von Laufzeiteffekten wird ein externer Korrekturwert statisch in die NC geführt und dort mit $K1 \cdot \overline{K6}$ aufgerufen. Durch die Parallelschaltung der Entkopplungsdioden wird die Kapazität zu groß, um dynamischen Betrieb zuzulassen.

Die Korrekturen $K2$ und $K3$ werden zum Tischumschlag benötigt. Ihre Vorzeichen sind im Befehl G 45 bis G 52 verankert. Der Aufruf ist für beide oder eine Achse sperrbar.

5.7.5. Weitere Unterprogramme

5.7.5.1. *Programmierbare Verweilzeit (G 04)*

Zur Unterbrechung des Programmablaufs (z.B. zum Freischneiden) ist eine Baugruppe mit programmierbarer Zeit nötig:

$t = n \, \Delta t$; $\Delta t = 0{,}1$ s entnimmt man einem 10-Hz-Generator,

$n \in \{1$ bis $999\}$ wird aus einem voreingestellten Rückwärtszähler abgeleitet.

Der Verweilzeitaufruf wird bei Hauptkoinzidenz bzw. durch den Taster „Verweilzeit" wirksam.

5.7.5.2. *Grobbearbeitung (G 61), Grobpositionieren (G 62)*

Grobbearbeitung ruft 10 vorschubabhängige Vorabschaltwerte auf, deren Auswahl aus den Ziffern der Tetrade 10^1 des Vorschubspeichers abgeleitet wird, wenn die zusätzliche Bedingung

$\overline{\text{Kettenmaß}} \cdot \overline{\text{Einrichten}} \cdot \text{Vorabschaltung} \cdot \overline{K6}$

erfüllt ist.

Grobpositionieren (Schnellhalt) ruft einen achsabhängigen Vorabschaltwert auf, an dem aus dem Eilgang abgeschaltet wird (Bedingung wie bei G 61).

5.7.5.3. *Tischumschlagbearbeitung (G 69)*

Diese Bearbeitungsart ist notwendig, wenn das auf einem Drehtisch achsparallel aufgespannte Werkstück von mehreren Seiten bearbeitet werden soll. Dazu wird der Rechenzyklus in Abhängigkeit von der Tischlage gesteuert.

Im Bild 5.57 erfolgte die Koordinatenfestlegung nach TGL 24319 Bild 16 (s. Abschn. 2.6.9.) für Kreuzschiebetisch-Fräsmaschine mit schwenkbarer Spindel, Drehung um die C'-Achse.

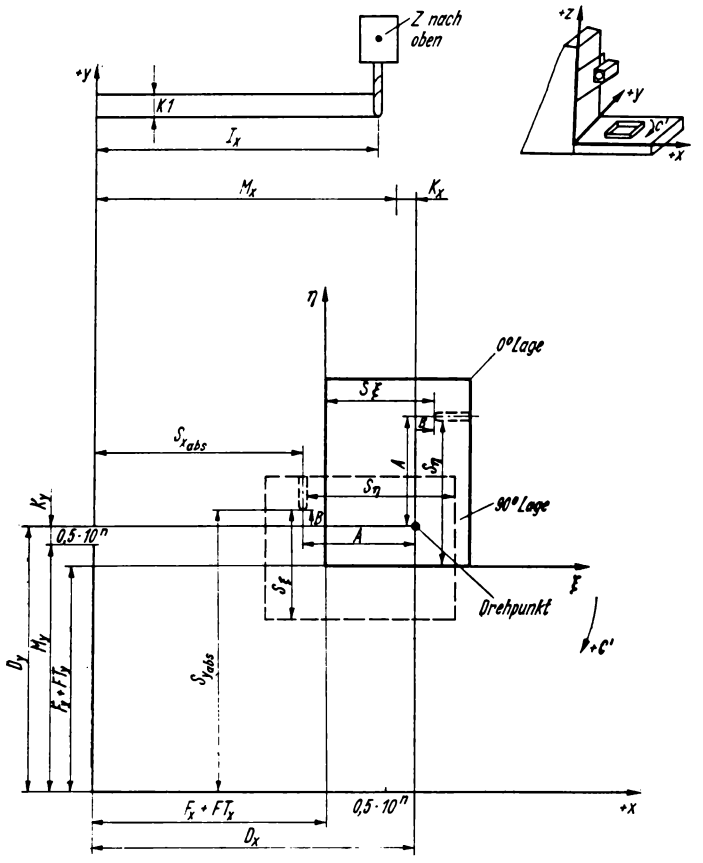


Bild 5.57. Tischumschlag

Ableitung der Transformationsgleichungen:

Festwerte	$F_x + FT_x \quad F_y + FT_y$
Sollwerte, relativ	S (Bohrtiefe); S_η
Drehpunktabstände	$A = F_y + FT_y + S_\eta - D_y$
	$B = F_x + FT_x + S_\xi - D_x$
Drehpunktkoordinaten	$D_x = M_x + K_x$
	$D_y = M_y + K_y$
	$M_{x,y}$ Mitte des Meßbereichs der absoluten Geber, bei WMS $10^6 \triangleq 0{,}5 \cdot 10^6$

Istwerte, absolut	I_x, I_y
Lagekorrekturen	$K_x = K2; K_y = K3$ (Korrekturen zwischen Drehpunkt und Meßbereichsmitte)
Werkzeugkorrektur	$K1$ (wird bei Istwertaddition komplementiert)
Vorabschaltwert	V (bleibt achsabhängig erhalten)

0°-Lage war nach Gl. (5.6)

$$|F + FT + K1 + K2 + S + K3 - I| - (Vi + 1) = \Delta 2 .$$

In dieses Rechenschema ist auch die Tischumschlagbearbeitung zu zwängen.
90°-Lage, x-Achse:

$$\begin{aligned} S_{x\,\mathrm{abs.}} &= D_x - A = (M_x + K_x) - (F_y + FT_y + S_\eta - D_y) \\ &= M_x + K_x + M_y + K_y - F_y - FT_y - S_\eta \end{aligned} \tag{5.7}$$

Die Hauptkoinzidenzbedingung mit allen Summanden lautet

$$\begin{aligned} S_{x\,\mathrm{abs.}} - I_x - Vi = &- F_y - FT_y\,(+\,K1) + K_x - S_\eta + K_y \\ &+ M_x + M_y - I_x - Vi = 0 , \end{aligned} \tag{5.8}$$

läßt sich aber nicht mit dem festen Zyklus von 8 Summanden in Einklang bringen. Darum ist an den Maschinenbau folgende Forderung zu stellen:
$M_x = M_y = 0{,}5 \cdot 10^n$, d.h. gleicher Meßbereich ($10^n\ \Delta\ i$) und gleiche Auflösung ($\Delta\ i$) an beiden Achsen.

Damit aus Gl. (5.8)

$$F_y + FT_y - K1 - K_x + S_\eta - K_y + I_y + Vi = 10^n . \tag{5.9}$$

Die Bewegungsrichtung wird aus $\ddot{u}_n$ abgeleitet, denn

$\Sigma \geqq 10^n \rightarrow$ Dezimalenübertrag $\ddot{u}_n$ vorhanden bedeutet negative Richtung,

$\Sigma < 10^n \rightarrow$ Dezimalenübertrag $\ddot{u}_n$ fehlt bedeutet positive Richtung.

Der Übertrag $\ddot{u}_n$ wird gelöscht, denn bei Hauptkoinzidenz muß das Ergebnis der Summation, die rechte Seite von Gl. (5.9), verschwinden.

Die Sollwert-Istwert-Differenz muß zum Zweck der Anzeige bei positiver Richtung („Σ" minus 10^n) komplementiert werden.
Für die y-Achse analog:

$$F_x + FT_x + K1 - K_x + S_\xi + K_y - I_y - Vi = 0 . \tag{5.10}$$

180°-Lage

$$x\text{-Achse: } F_x + FT_x - K1 - 2K_x + S_\xi + I_x + Vi = 10^n \tag{5.11}$$

$$y\text{-Achse: } F_y + FT_y - K1 - 2K_y + S_\eta + I_y + Vi = 10^n \tag{5.12}$$

270°-Lage

$$x\text{-Achse: } F_y + FT_y + K1 + K_x - K_y + S_\eta - I_x - Vi = 0 \tag{5.13}$$

$$y\text{-Achse: } F_x + FT_x - K1 + K_x - K_y + S_\xi + I_y + Vi = 10^n \tag{5.14}$$

5.7.5.4. *Feste Zyklen (G 81 bis G 89)*

Die Bearbeitungszyklen (BAZ) dienen der Einsparung von Programmieraufwand für sich oft wiederholende Abläufe (s. Abschn. 2.6.7.).

Nach TGL 200-0863/05 gilt gemäß Bild 5.58 für NC 400:

G 81 Eilgang (Z_1) – Vorschub (Z_2) – Eilrücklauf (Z_1)
G 82 Eilgang (Z_1) – Vorschub (Z_2) – Verweilzeit – Eilrücklauf (Z_1)
G 83 Eilgang (Z_1) – Vorschub (Z_2) – kein Rücklauf, neuer Satz für Z_3 (Bohren mit Sprungvorschub)
G 84 Eilgang (Z_1) – Vorschub (Z_2) – Drehrichtungsumkehr der Spindel – Rücklauf im Vorschub (Z_1); „Spindel Stopp" ist mit „Vorschub Stopp" gekoppelt (Gewindeschneiden)
G 85 Eilgang (Z_1) – Vorschub (Z_2) – Rücklauf im Vorschub (Z_1)
G 86 Eilgang (Z_1) – Vorschub (Z_2) – „Spindel Stopp" – Eilrücklauf (Z_1) (Aufbohren)
G 87 bis G 89 analog.

Jeder BAZ beginnt nach Positionierende mit Eilgang und einem Vorhaltwert.

Die für die Zyklen benötigten Zahlenwerte stehen nach Bild 5.58, rechts,

Z_1 im Speicher Festwerttransformation *FT*

Z_2 im Sollwertspeicher *S*

Z_{BAZ} als Zwischenwert im Speicher Bearbeitungszyklus *BAZ*.

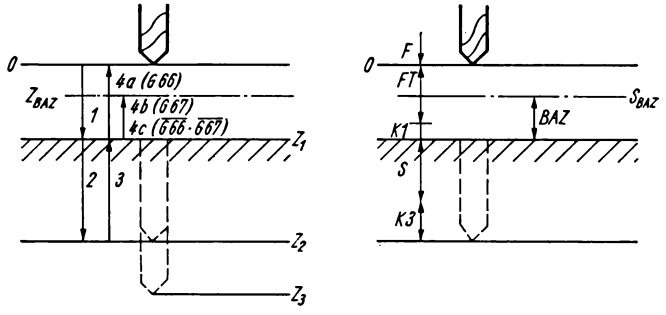


Bild 5.58. Bohrzyklen

Die 4 Teilarbeitsgänge nach Bild 5.58 werden einem 2-bit-Zähler entnommen.

$$\text{Teilstrecke 1: } F + FT + K1 + K2 - I = \Delta; \tag{5.15}$$

$\Delta = 0$ gibt Koinzidenz aus.

Sollwert *S* und Sollwertkorrektur *K3* dürfen nicht mit aufgerufen werden.

$$\text{Teilstrecke 2: } F + FT + K1 + K2 + S + K3 - I = \Delta \tag{5.16}$$

$$\text{Teilstrecke 3: } F + FT + K1 + K2 + K3 - I = \Delta; \tag{5.17}$$

Δ bei Beginn $< 0 \rightarrow$ neg. Verfahrrichtung.

Damit das Werkzeug etwas über die Werkstückoberkante hinausführt, um Kratzen zu vermeiden, wird ein Korrekturwert aus einer Diodenmatrix aufgerufen.

Teilstrecke 4:

a) G 66 löst Eilrücklauf bis zum Endschalter aus, der den Zyklus beendet und den Zähler nullt.

b) G 67 läßt bis auf einen Zwischenwert, eingeschrieben im Sollwertspeicher S_{BAZ}, zurückfahren.

$$F + FT + K1 + K2 - S_{BAZ} + K3 - I = \Delta; \tag{5.18}$$

$\Delta = 0$ beendet den Zyklus und nullt den Zähler.

c) Ohne Rücklauf über die Werkstückkante hinaus setzt Teilzyklus 3 das Endesignal ($\overline{G66} \cdot \overline{G67}$).

Die Zählerschaltung erfolgt durch eine Einimpulsschaltung nach Bild 5.26.

Bei der NC 430 wird mit G 86 bis G 89 (Achsen, Richtung) ein Bohrunterprogramm für Leiterplattenbohrmaschinen wirksam, mit dem Lochreihen mit einem gleichen, bis 9,99 mm einstellbaren Abstand zwischen den maximal 256 möglichen Löchern gebohrt werden können.

5.7.6. Löschimpulsbildung

Beim Einschalten einer NC treten undefinierte Zustände auf, die erfordern, daß durch einen Befehl der Initialzustand an den Speichern („Generell Nullen") hergestellt wird (Bild 5.59).

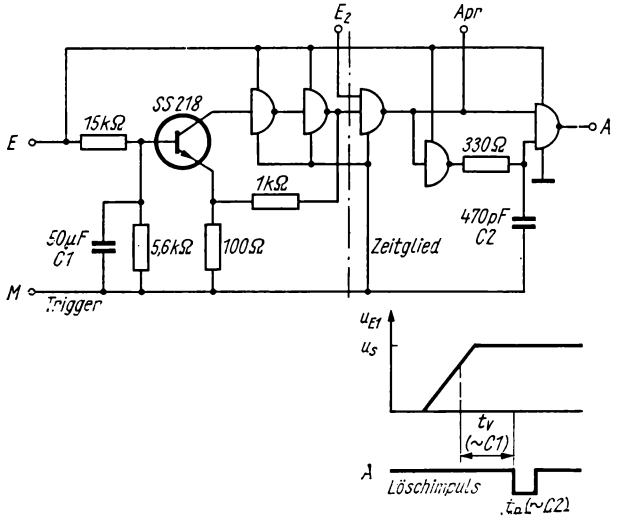


Bild 5.59. Löschimpulserzeugung

Trigger [5.16] [5.17] dienen generell zur Flanken- und Signalregenerierung. Zur Zusammenarbeit mit TTL ist die Schaltung Bild 5.60 [5.17] geeignet, die wegen des Fehlens von Emitterwiderständen unkritisch bezüglich 0-Signal ist. C verbessert die Schaltzeiten, $R1$ verändert die Ansprechwerte, $R2$ die Hysterese, $N_0 = 10$.

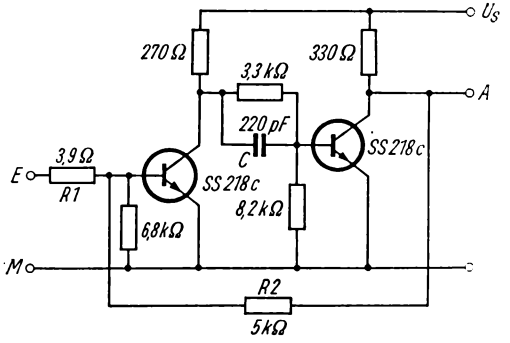


Bild 5.60. Trigger, diskreter Aufbau

5.7.7. Anschluß inkrementaler Geber an die absolute Steuerung

Die Impulsreihen des inkrementalen Gebers werden gemäß Abschn. 5.3.1.2. aufbereitet. Die Zählfolge wird einem BCD-VR-Zähler mit einer Kapazität von 39 (≙ 6 bit) zugeführt und nach Aufruf in einen Pufferspeicher bei gleichzeitiger Nullung des Zählers übernommen (Bild 5.61).

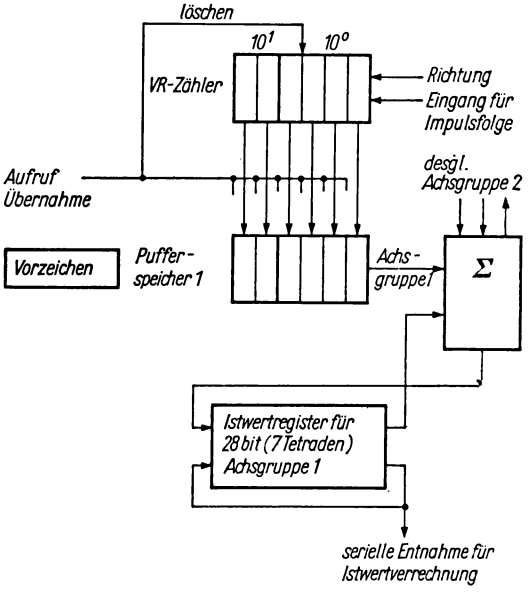


Bild 5.61. Anschluß inkrementaler Geber an absolute Steuerung

Das Rechenwerk addiert den Inhalt des Pufferspeichers seriell zum Inhalt des Istwertregisters, das zur Verrechnung wie ein Sollwertspeicher abgefragt wird.

Die Zähler- und Pufferkapazität von 39 muß während der Abarbeitung einer Achse (512 Takte $\triangleq$ 341 µs) alle einlaufenden Impulse aufnehmen können, da sich während dieser Zeit das Istwertregister nicht ändern darf. Die Addition des Puffers zum Istwertregister beider Achsen erfolgt in jeder „8. Dezimale" mit je 28 Takten. Das entspricht einer Frequenz von $f \leqq Z/t = 39/341 \cdot 10^{-6} = 114\,000\,I/\mathrm{s}$.

Die erreichbare Geschwindigkeit ist bei Impulsvervierfachung (2,5-µm-Auflösung) $114\,000 \cdot 2{,}5 \cdot 10^{-6} = 0{,}286$ m/s $\triangleq$ 17,2 m/min.

5.8. Funktionseinheiten für spezielle Bahnsteuerungsfunktionen

5.8.1. Steuerwerk

Informationsübernahme, Koordinatenrechner und Interpolator einschließlich Vorschubgeschwindigkeit werden durch eine Folge von 32 Takten ($\triangleq$ 16 µs bei $f_T = 2$ MHz) aus dem Taktzähler (Bild 5.62) gesteuert.

Der Taktzyklus *Tz 4 ··· 27* ist die Basis für die Rechenzyklen im Koordinatenrechner, von denen maximal 16 durch einen nachgeordneten Ablaufzähler aufgerufen werden. Die Dezimalenweiche (s. Bild 5.83) wird von einem Stellenzähler gesteuert, der in Stellung „6" Fehler ausgibt, wenn nicht durch eine neue Achsadresse seine Rückstellung erfolgte.

Um die Rechenzyklen in die Eingabepause zwischen zwei Eingabezeichen legen und dadurch bereits korrigierte Werte in den Interpolationsregistern abspeichern

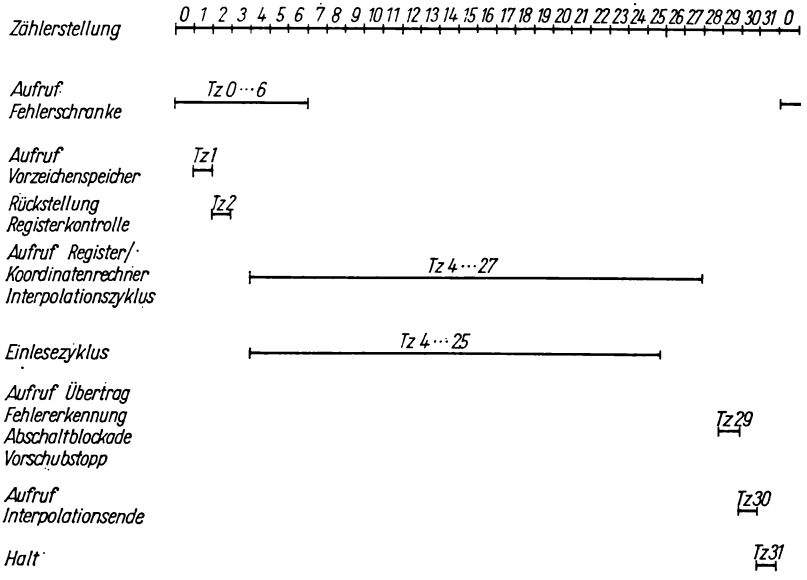


Bild 5.62. Taktfolge NC 450

zu können, muß eine feste Eingabereihenfolge eingehalten werden, die sich im Programmformular bzw. in organisatorischen Festlegungen niederschlägt.

Das längste Additionsprogramm erfordert die Lagekorrektur mit 16 Rechenzyklen (Eingabe 1, Umsetzen x oder z 10; Berechnen x_e oder z_e 4, Korrektur 1)

$$32\,\frac{\text{Takte}}{\text{Zyklus}}\cdot 16\,\frac{\text{Zyklen}}{\text{Dezimale}}+2\,\frac{\text{Synchronisiertakte}}{\text{Dezimale}}$$

(am Anfang bis Lesebeginn nötig; Ein-Impuls-Schaltung!)

$$= \underline{514\ \text{Takte/Dezimale.}} \tag{5.19}$$

Das längste Multiplikationsprogramm benötigt dagegen nur

$$32\,\frac{\text{Takte}}{\text{Zyklus}}\left(9\,\frac{\text{Additionszyklen}}{\text{Dezimale}}+1\,\frac{\text{Eingabezyklus}}{\text{Dezimale}}\right)$$
$$+\,2\,\frac{\text{Synchronisiertakte}}{\text{Dezimale}} = \underline{322\ \text{Takte/Dezimale.}} \tag{5.20}$$

Die Lesereingabe soll im Durchlaufbetrieb arbeiten, d.h., es darf im Satz kein Stopp zwischen zwei Zeichen erforderlich werden. Um zwischen diese alle Rechenoperationen einschachteln zu können, wird bei 2 MHz Taktfrequenz eine Lesefrequenz von

$$v_{\text{Leser max}} = \frac{2\,000\,000\ \text{Takte/s}}{514\ \text{Takte/Zeichen}} = 3900\ \text{Z/s} \tag{5.21}$$

zulässig.

Es ist daher ohne Belang, die Ablauffrequenz für den Koordinatenrechner zu vierteln (500 kHz), wodurch sich unkritische Signallaufzeiten, kleinere Recheninkremente (2,5 μm) bei kleinerem minimalem Radius (s. Abschn. 5.8.4.4.) ergeben und gleichzeitig Gewindeschneiden großer Steigung (s. Abschn. 5.8.3.6.) ermöglicht wird.

Durch den nur 22 Takte langen Einlesezyklus stehen die dualen Werte um zwei Stellen verschoben im Register, sind also mit 4 multipliziert (4 Recheninkremente ≙ 1 Eingabeinkrement), s. Abschn. 5.8.2.2.

5.8.2. Interpolator

5.8.2.1. *Allgemeines*

NC-Bahnsteuerungen geben entsprechend ihrem rechentechnischen Auflösungsvermögen die Sollwerte als Impuls oder als Spannungswert an den Lageregelkreis. Die dazu erforderliche Datenmenge ist im Vergleich zur Punkt-Strecken-Steuerung wesentlich höher. Legt man die Vorbereitung dieser Informationsmenge in die EDV außerhalb der NC (äußere Datenverarbeitung) und speichert sie in einem Magnetband, liegt ein Außeninterpolator vor. Die Achsen werden direkt mit frequenz- oder impulscodierten Daten simultan gesteuert, wobei je Achse eine Spur bespielt ist und eine Referenzspur den Zeitparameter einführt.

Wegen des für die Werkstattatmosphäre wenig geeigneten Magnetbandes und der umständlichen Datenkorrektur über die EDVA sowie der Schwierigkeit der Werkzeugkorrektur durch Berichtigung jedes einzelnen Ausgabebefehls an den Antrieb haben sich diese Interpolatoren nicht durchsetzen können.

Der Lochstreifen als Datenträger genügt, wenn nur charakteristische Werte der Kurve eingegeben werden, mit denen sie aber mathematisch eindeutig beschrieben wird (s. Abschn. 2.6.5.).

Innerhalb der Steuerung wird im Inneninterpolator die Approximation zwischenzuschaltender Punkte an die Kurve ausgeführt. Dabei sind

- konstante Bahngeschwindigkeit
- glatte Übergänge an den Stützpunkten bei tangentialem Anschluß (außer bei Linearinterpolation)
- ausreichende Genauigkeit

zu erreichen.

Interpolatoren sind Einzweckrechner, die im Echtzeitbetrieb durch lineare, lineare zirkulare oder parabolische Kurven annähern, die zwischengeschalteten Interpolationspunkte werden durch Geraden verbunden. Alle bekannten Verfahren stellen den neuen Koordinatensollwert als Inkrementzuwachs dar.

Die am häufigsten ausgeführte Linear-Zirkular-Interpolation ist darin begründet, daß die Mehrzahl der Konstruktionen durch Kreis- und Geradenfunktionen beschrieben bzw. anzunähern sind (Zirkel und Lineal als Arbeitsmittel des Konstrukteurs) und ökonomische Lösungen erreicht werden.

Die parabolische Interpolation ergibt wegen variabler Krümmung den besten knicklosen Übergang (auch bei großem Stützpunktabstand) von gekrümmten zu geraden Kurven.

Theoretisch sind auch andere Funktionen als Grundlage für die Interpolation denkbar, die aber Rechnerprogrammen vorbehalten wären. Dabei wird der Rechner zeitlich stark belastet, weshalb auch bei CNC die Interpolation z.T. festverdrahtet ausgeführt wird.

Bei den Bahnsteuerungen wird es notwendig, die programmierte Bahn dann zu korrigieren, wenn der Fräserradius nicht eingerechnet wurde (Programmierung der Werkstückoberkante) oder vom Vorgabewert abweicht. Man erhält eine Kurve gleichen Abstands zur programmierten (Äquidistante). Diese ist beim Kreis wieder ein Kreis, bei der Parabel eine Kurve anderer mathematischer Form. Damit ist die Äquidistante bei der Parabel (Bild 5.63) nur über die aufwendige Berechnung der Winkelfunktionen sin α (bzw. cos α) aus

$$\sin\alpha = \frac{p}{n} = \frac{p}{\sqrt{y_1^2 + p^2}} = f(p) \tag{5.22}$$

zu ermitteln.

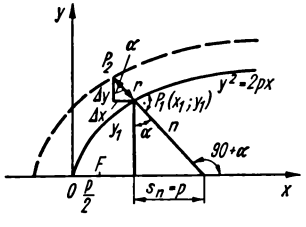


Bild 5.63. Äquidistante der Parabel

5.8.2.2. *Interpolator für direkte Funktionsberechnung*

In [5.29] wurden die möglichen Codierungen und Arbeitsweisen unter zeitlichen und ökonomischen Gesichtspunkten untersucht, woraus serielle Arbeitsweise von Dualzahlen abgeleitet wurde.

Die zulässige Interpolationszeit für $\Delta s = 10\ \mu m$ beträgt bei $v_{max} = 5$ m/min

$$t_I \leqq \frac{\Delta s}{v_{max}} = \frac{0{,}01 \cdot 60}{5000} \cdot 10^6 = 120\ \mu s.$$

Bei einem Recheninkrement von 2,5 μm (Teiler 1:4), einer Taktfrequenz $f_T = 2$ MHz und einem Interpolationszyklus von 32 Takten kann man einen Vorschubimpuls aller

$$t = \frac{32 \cdot 4}{2 \cdot 1} = 64\ \mu s$$

erhalten.

Oft wird die Interpolation nach Gl. (2.36) bzw. Gl. (2.50) (Bild 5.64)verwendet.

Durch die Verteilungslogik wird bei Geradeninterpolation (G 01) das Paar x_e, y_e zur Verrechnung gebracht und dem Register $\langle x_M \rangle$ der Wert y_e, Register $\langle y_M \rangle$ der Wert x_e gemäß Gl. (2.36) zugeführt. Gleichzeitig werden die Register x_E, y_E mit den gleichen Daten gefüllt. Bei Kreisinterpolation (G 02, G 03) erhalten die Register ihre unvertauschten Werte x_m, y_m, x_e, y_e. Die Übernahme erfolgt bei „Interpolationsende" aus dem Koordinatenrechner (*Tz 4 ... 27*), Vorzeichen mit *Tz 1*.

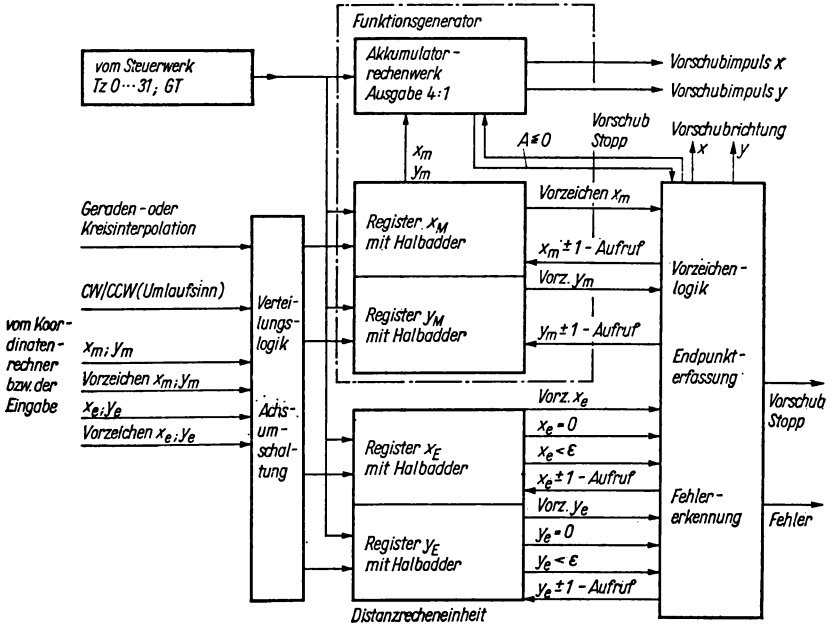


Bild 5.64. Interpolator

Bei Gewindeschneiden wird die Zahl der Gewindegänge unter Adresse C in das x_E-Register eingeschrieben.

Im Funktionsgenerator erfolgt die eigentliche Interpolation. Er besteht aus den

- Registern x_M, y_M mit Halbadder ($\pm$ 1) und
- dem Akkumulator-Rechenwerk

und erzeugt gemäß Interpolationsformel die Vorschubimpulse an die beiden bahngesteuerten Achsen. Dabei wird die Geschwindigkeit vom Geschwindigkeitssteuerwerk als Auslöse-Impulsfolge vorgegeben, deren Einzelimpulse einen Interpolationszyklus von 32 Impulsen (Bild 5.62) anregen.

Gemäß Gln. (2.36) und (2.46) gibt das Geschwindigkeitssteuerwerk n Schritte vor, die n Zyklen auslösen, und der Funktionsgenerator zerlegt diese n Impulse in k Impulse in x- und l-Impulse in y-Richtung, so daß $n = k + l$.

Die Mittelpunktregister sind 24-bit-Schieberegister. Damit läßt sich ein Radius von $(2^{22} - 1)\ \Delta s = 4194303\ \Delta s \approx 4 \cdot 10^6\ \Delta s$ unter Berücksichtigung des Teilers 1:4 verwirklichen, der wegen der Einheitlichkeit mit dem maximalen Interpolationsabschnitt auf 10^6 begrenzt wird. Diese Multiplikation mit 4 beim Einlesen erhöht die Wirkung der Funktionseinheit „Konstantgeschwindigkeit". Ausgegeben werden dürfen jedoch nur 1:4 untersetzte Impulszahlen (2-bit-Zähler!).

Gemäß den Bildern 2.26 und 2.27 (s. S. 57) werden mit jedem ausgeführten Schritt die Koordinaten x_m bzw. y_m um $\pm$ 1 verändert.

Bei 2 Summanden ist Summe bzw. Differenz $s_p = d = a\,\bar{b} \vee \bar{a}\,b$ [Gl. (2.5)],

Summenübertrag

$$\ddot{u} = a\,b \tag{5.23}$$

Differenzübertrag

$$m = \bar{a}\,b \tag{5.24}$$

mit $b = \pm 1$.

Bei Addition bleibt das *FF1* (Bild 5.65) so lange gesetzt, bis der Übertrag zur nächsten Stelle verschwindet, wozu die Ziffer $a_i = 0$ führt, bei Subtraktion bei $a_i = \mathrm{L}$ (*G3*). Ist *FF1* nicht (mehr) gesetzt, wird der Registerinhalt im Ring geschoben.

Quadrantenübergänge machen einen der M-Speicher zu 0 (*FF2*/$Q = 0$). *FF3* kontrolliert den Registerinhalt auf eine minimale Größe $\leqq 2^9$, (s. Abschn. 5.8.4.). Die Schranke wird erreicht, indem das *FF3* erst im 10. Takt mit der Verrechnung 2^9 wirksam wird.

Unter Beachtung der Tafel 2.3 (s. S. 52) erfolgt bei $x_m = 0$ bzw. $y_m = 0$ ein Vorzeichenwechsel, der vom „Nulldurchgang" und vom sgn Δx bzw. sgn Δy abhängt. Mit letzterem wird gleich der Umlaufsinn mit erfaßt.

Beispiel: Der Wechsel $x_m < 0$ in $x_m > 0$ bei $\Delta x < 0$ heißt bei

Linkslauf I. → II. Quadrant

Rechtslauf IV. → III. Quadrant.

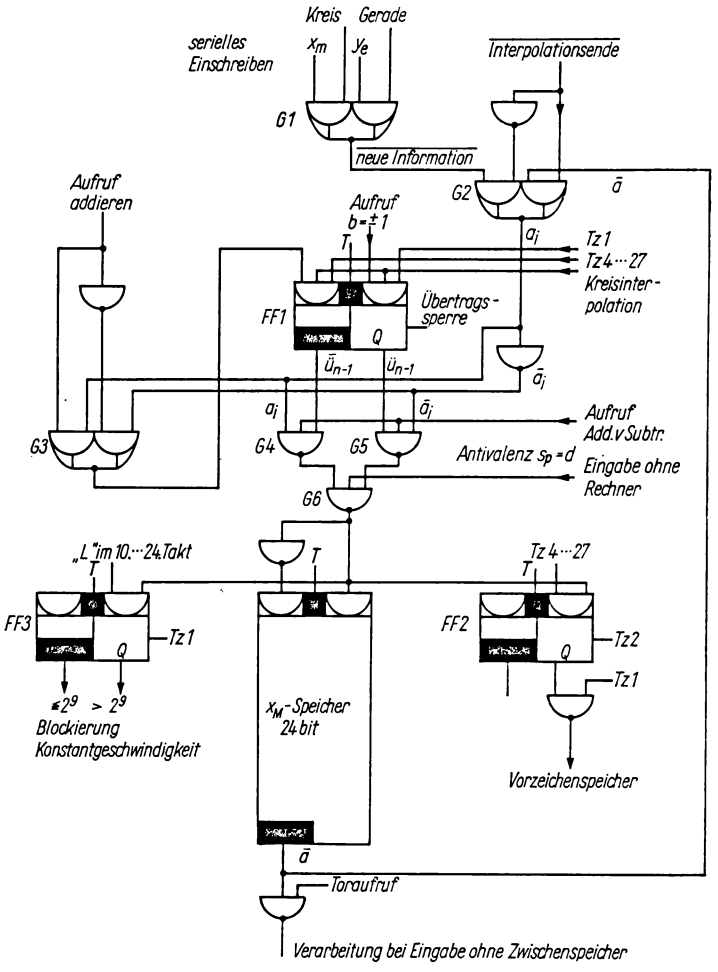


Bild 5.65. Register x_M mit Halbadder

Das Akkumulator-Rechenwerk (Bild 5.66) dient der Addition der ΔD_{xk} bzw. ΔD_{yl} zum gespeicherten Wert D_{k+l} für den neuen Entscheidungsoperator D_{k+l+1}.

$$D_{k+l} = D_{k+l-1} + (\Delta D_{xk} \text{ oder } \Delta D_{yl}) = \langle A \rangle \pm \langle x_M \rangle \text{ oder } \langle y_M \rangle \tag{5.25}$$

Da ΔD_{xk} und ΔD_{yl} stets ungleiches Vorzeichen aufweisen, wurde die Adderansteuerung vereinfacht, wodurch die Abläufe gegenüber den Bildern 2.26 und 2.27 abweichen. Stets wird $-|x_m|$ und $+|y_m|$ verrechnet. Aus dem Übertrag der

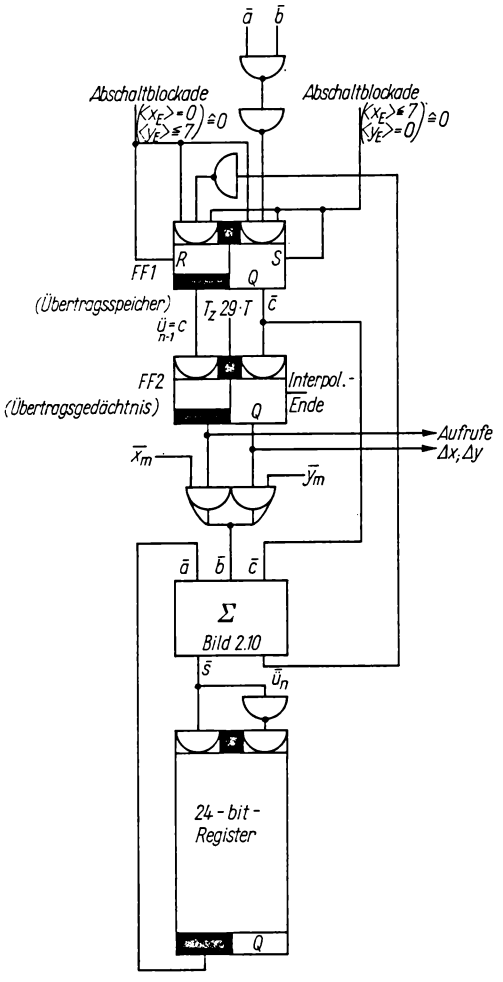


Bild 5.66
Akkumulator-Rechenwerk

Addition ist erkennbar, ob die Summe $\gtrless 0$ ist („Σ" $\leqq 0 \rightarrow$ kein Übertrag). Er wird gespeichert, wobei bei seinem Umschlag die andere Koordinate aufgerufen wird. Bei der Interpolation wird in jeweils 24 Takten folgendes ausgeführt (Bild 5.66):

- Register löschen, *FF1* setzen ($\bar{u}_{n-1} = \bar{c}_n$)
- *FF2* ruft x_m auf, gesetzt durch Interpolationsende
- Rechnung $D_{k+1} - |x_m| = 0 - |x_m|$, Ergebnis $(B-1)$ Komplement im Akkumulator. Man erhält die um 1 zu kleine konegative Zahl.
  Das negative Ergebnis wird, da ohne Vorzeichen- und Schutzstelle gearbeitet wird, im fehlenden Übertrag wirksam.

Der fehlende Übertrag bewirkt ein Kippen des *FF2*, wodurch y_m aufgerufen wird.

$$D_{k+l} \leqq 0 \rightarrow + \,|\, y_m \,|\text{ verrechnen, außer im 1. Schritt}$$

$$D_{k+l} > 0 \rightarrow - \,|\, x_m \,|\text{ verrechnen.}$$

– Der Algorithmus $D_{k+l} + |y_m|$ wird zu einer Subtraktion, da $D_{k+l} < 0$ als Komplement vorliegt. $D_{k+l} + |y_m|$ wird so oft wiederholt, bis sich das Vorzeichen des Ergebnisses ändert, das heißt, $D_{k+l} > 0$, was im Auftreten eines Endübertrages im 24. Schritt sichtbar wird. Es entsteht das um 1 zu kleine wahre Ergebnis. Dieser Übertrag wird im Takt 29 in das *FF2* eingeschrieben und schaltet auf $-|x_m|$ um. Die Verrechnung $D_{k+l} - |x_m|$ erfolgt so lange, bis $D_{k+l} < 0$ wird und wieder ein konegativer Wert vorliegt.

Bemerkung: $\ddot{u}_n = a \cdot b$. Der Speicher $\langle \ddot{u} \rangle$ wird rückgesetzt, wenn $\bar{a} \cdot \bar{b}$, da bei einem L an a oder b der Übertrag weiter bestehen bleibt (s. Beispiel).

FF1 wird nach Q = L gesetzt, wenn beim Einlaufen von x_m mindestens eine 1 vorhanden ist.

Beispiel:

		$\bar{a} \cdot \bar{b}$		$a \cdot b$	
		↓		↓	
a	L	0		L	L
b	L	0		0	L
$\ddot{u}$	L	0	← L ←	L	0
		↖		↖	
		0	L	0	0

Ein besonderes Endpunktprogramm ist nötig, wenn durch die Interpolation der programmierte Endpunkt nicht exakt erreicht wird. Um das Interpolationsende zu erkennen, wird ein „Fehlerfenster" $(2\,\varepsilon)^2$ festgelegt, in das die Bahn einlaufen muß.

Ausgehend von mit x_m und y_m gleichfalls mit verändertem x_e-, y_e-Wert (s. Distanzrecheneinheit), wird beim Eintritt in das Fehlerfenster und Erreichen einer der Endkoordinaten *FF1* blockiert (Abschaltblockade). Dadurch gibt

$y_e = 0$ nur x-Impulse

$x_e = 0$ nur y-Impulse

eventuell unter Vorzeichenkorrektur aus, wodurch P_e exakt erreicht wird. Kurve *3*, Bild 5.67, zeigt den Vorzeichenwechsel.

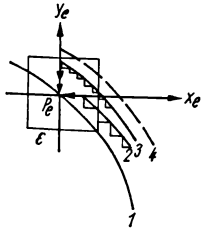


Bild 5.67. Fehlerfenster

Einfahren nach Kurve *4* führt nicht zum Abschalten, da $f(x_e) = f(0)$ außerhalb des Fensters liegt. Hier wirkt die Fehlererkennung. Deshalb lautet die Abschaltbedingung zur Einleitung des Endpunktprogramms:

Vorschubstopp $x = (x_e = 0) \cdot (y_e \leqq \varepsilon) \cdot Tz29 \cdot GT \cdot \overline{\text{Blockade}}$

Vorschubstopp $y = (y_e = 0) \cdot (x_e \leqq \varepsilon) \cdot Tz29 \cdot GT \cdot \overline{\text{Blockade}}$.

Die diversen Vorzeichenfestlegungen innerhalb des Endpunktprogramms sind in [5.30] enthalten.

Erkannt werden Bahnende und Fehlerfenster durch die Distanzrecheneinheit. Durch Addition von ± 1 bleibt auch x_e, y_e auf den aktuellen laufenden Punkt bezogen. Obwohl stets beide Register umlaufen, erfolgt nur bei Aufruf der ± 1 eine Verrechnung. Die Vorzeichen werden in *Tz 1* so gesteuert, daß auch bei Interpolation über mehrere Quadranten $x_e > 0$, $y_e > 0$ sind. Das Fehlerfenster wird durch ein FF erkannt, das für *Tz* 0 bis *6* gesperrt ist und ab *Tz 7* ein L erwartet. Damit ist $\varepsilon = 7$ (3 Taktzeiten *4* bis *6*).

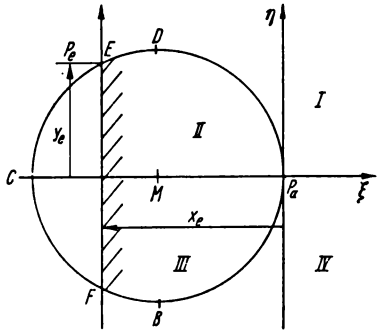


Bild 5.68. Vorzeichenfestlegung

Nach Bild 5.68 ist bei jedem Quadrantenwechsel an den Punkten *B*, *C* und *D* eines der Vorzeichen der Δx oder Δy zu tauschen, wozu für alle Quadranten logische Schaltungen zur entsprechenden Vorzeichenfestlegung vorbereitet sind.

Letztlich sind auch die Vorzeichen von x_e, y_e beim Nulldurchgang im *Tz 1* zu wandeln. Zum Beispiel ist links der Geraden $\overline{EF}$ $x_e > 0$ beim Lauf des Koordinatensystems ξ, η über mehrere Quadranten. Nur innerhalb des Fehlerfensters führt das Erreichen des Nullwertes einer Koordinate x_e oder y_e zum Endpunktprogramm. Am Punkt *F* wird bei Rechtslauf das Abschalten verhindert. Bei Linearinterpolation werden x_e, y_e grundsätzlich verkleinert.

In der getrennten Vorzeichenlogik werden aus den gespeicherten Vorzeichen der Eingabekoordinaten und dem Laufrichtungsspeicher die Rechenvorzeichen und die Richtung der Vorschubimpulse ermittelt. Beim Quadrantenwechsel tritt dabei Vorzeichenwechsel ein.

Die grundlegenden Beziehungen lauten gemäß Tafel 2.3 (s. S. 52):

Subtr. D_x · Add. $D_y = \{[(x_m < 0) \cdot (y_m < 0) \vee (x_m > 0) \cdot (y_m > 0)]$

$\times$ (Linkslauf · vorwärts $\vee$ Rechtslauf · rückwärts)}

$\vee$ {[$\overline{\cdots}$] · (Rechtslauf · vorwärts $\vee$ Linkslauf · rückwärts)}.

Die Vorschubrichtung wird durch Δx, Δy festgelegt.
Aus Tafel 2.3 ist ersichtlich

$$+|\Delta x| = (y_m > 0) \cdot \text{links} \vee (y_m < 0) \cdot \text{rechts}$$
$$-|\Delta x| = (y_m < 0) \cdot \text{links} \vee (y_m > 0) \cdot \text{rechts},$$

wobei wieder mit Vorwärts-Rückwärts-Laufrichtung verknüpft werden kann.

Die Fehlererkennung spricht an, wenn das Fehlerfenster mit $\varepsilon = 7\,\Delta s$ so verfehlt wird, daß innerhalb seiner Fläche weder $x_e = 0$ noch $y_e = 0$ auftritt, d.h., das Distanzrechenregister erhält den inversen Rechenbefehl bei $x_e \vee y_e > \varepsilon$. In [5.30] sind alle Möglichkeiten des Vorbeilaufens am Endpunkt und die daraus resultierenden Fehlersignale sowie die Blockierung beim Durchlaufen mehrerer Quadranten dargestellt. Da beim Vollkreis Anfangs- und Endpunkt zusammenfallen, haben x_e, y_e zu Beginn den Wert 0, wodurch bereits die Abschaltbedingung erfüllt wäre. Diese wird durch eine spezielle Schaltung verhindert und erst freigegeben, wenn eine Koordinate $> \varepsilon$ wurde.

Die Genauigkeit wurde bei $r = 50$ mm mit ± 2 Recheninkremente $= \pm 5\,\mu$m gemessen [5.31].

5.8.2.3. *DDA-Interpolator*

Die Interpolation nach Gln. (2.16) und (2.25) läßt sich auf einen gleichen Ablauf für den Linear- und Zirkularalgorithmus zurückführen (Bilder 5.69 und 5.70). Die Subtraktion erfolgt in den an anderer Stelle beschriebenen Addierwerken, die

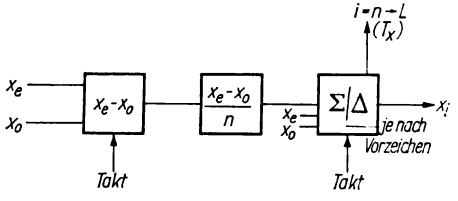


Bild 5.69. DDA-Interpolator für Gerade (1 Achse)

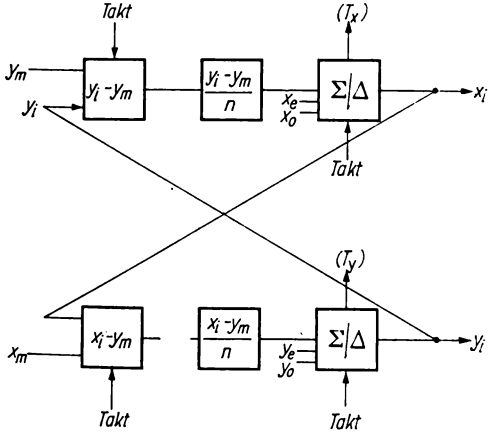


Bild 5.70. DDA-Interpolator für Kreis

Division durch Stellenverschiebung bei Binärzahlen, wenn η eine Potenz von 2 ist. x_i; y_i werden als Absolutwerte angegeben. Im Takt 0 wird der Anfangswert eingespeichert. Das Ende der Interpolation wird durch Vergleich $x_e \equiv x_n \rightarrow$ L festgestellt und gemeldet.

In der Praxis nutzt man die Addier-Subtrahier-Werke mehrfach aus, wodurch Einsparungen zu erzielen sind.

Das Vorzeichen der Summe $x_e - x_0$ usw. und die aufgerufene Interpolationsart bestimmen, ob im folgenden Summator addiert oder subtrahiert wird.

5.8.2.4. *Analog-parabolischer Interpolator*

Die verblüffende Einfachheit der mathematischen Beziehung Gl. (2.55)

$$x(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2$$

wird besonders mit analogen Mitteln leicht lösbar.

Die Sollwertvorgabe bei der in der DDR ausgeführten Steuerung „Paramat" erfolgt durch potentialfreie Genauigkeitstransformatoren, bei denen 400 V (≙ 100 mm) 4stufig in 10^4 Spannungswerte mit dem Elementarschritt von 0,04 V (≙ 0,01 mm) unterteilt werden. Im Stromkreis sind daher an der Spannungszuschaltung 4 Relais beteiligt, an deren Zuverlässigkeit und Konstanz der Übergangswiderstände höchste Anforderungen gestellt werden. Die Steuerung erhält die 5 Kurvenpunkte P_1 bis P_5 (Bild 5.71) in Form von Spannungswerten

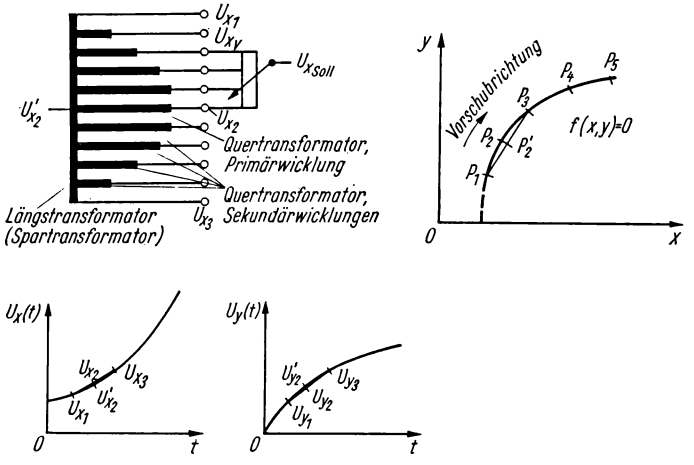


Bild 5.71. Parabolischer Interpolator

vorgegeben, von denen P_1 und P_3 bzw. P_3 und P_5 je einem Längs-, P_2 bzw. P_4 dem zugehörigen Quertransformator zugeführt werden. Die beiden Anordnungen werden zur Erzeugung einer sprunglosen Funktion zyklisch umgeschaltet. Die Sekundärwicklungen sind parabolisch nach Formel $y^2 = \frac{1}{3} x$ gestuft. Der Längstransformator (induktiver Spannungsteiler) erzeugt die Gerade $\overline{P_1 P_3}$ (Glied

$a_0 + a_1 t$), der Quertrafo korrigiert $P_2' \rightarrow P_2$ und gibt eine P_r entsprechende Spannung ($\cdots + a_2 t^2$) vor. Zwischen diesen wird ebenfalls in dem analog arbeitenden Ringpotentiometer linear interpoliert.

Die laufende zyklische Umschaltung und der mechanische Umlauf der Potentiometer lassen diese Anordnung nur für sehr langsame Vorgänge zu.

Der Istwert wird ebenfalls zur Vermeidung von Wandlungen in analogen Präzisionspotentiometern erfaßt.

Durch das Auflösungsvermögen der Potentiometer ergeben sich Summenfehler von etwa 40 mV, die Spannungsabfälle der Übertrager erreichen 35 mV, so daß trotz der mechanischen Geräte der theoretische Fehler unter 2 Inkrementen liegt.

5.8.3. Koordinatenrechner [5.32]

In numerischen Bahnsteuerungen wird eine nachträgliche Korrektur des Ablaufs wegen der im Programm noch nicht festzulegenden Einflußgrößen verlangt. Der dafür installierte Koordinatenrechner hat folgende Aufgaben:

- Zwischenspeicherung der Eingabedaten
- Berechnung der Werkzeugkorrektur (Lage und Durchmesser)
- Umrechnung von Bezugs- in Kettenmaß
- Nullpunkttransformation
- Umrechnung bei Tischumschlagbearbeitung
- Berechnung bei Gewindeschneiden
- Zwischenrechnung bei Unterprogrammen.

5.8.3.1. *Zwischenspeicherung der Eingabedaten*

Die zu interpolierende Bahn wird in mehreren Abschnitten beschrieben, die ohne spürbare Unterbrechung abzuarbeiten sind. Treten zwischen ihnen Informationsübernahmezeiten auf, die größer als die Antriebszeitkonstante sind, wird der Nachlauf des Antriebs abgebaut, und es tritt eventuell Stillstand ein, der am Werkstück markiert wird.

Nimmt man für Linearinterpolation nur 30 Zeichen (Z) je Satz an (Satznummer 4, Koordinaten 12, Korrekturen 10; G-Befehl 3, Satzende 1), ergibt das bei einer Lesegeschwindigkeit von 200 Z/s bereits eine für Fräsmaschinen zumindest unzulässige Übernahmezeit von 150 ms. Man speichert deshalb den nächsten Satz während der Abarbeitung des vorherigen und übernimmt in einem Interpolationszyklus von 16 µs. Dabei muß der Leser nur so schnell sein, daß die Lesezeit $\leqq$ Abarbeitungszeit ist. Der Einsatz sehr schneller Leser (> 1000 Z/s) ist in der Werkstattumgebung nicht zu empfehlen.

Bei einer Bearbeitungsgeschwindigkeit $v_T = 5$ m/min wird mit 150 ms Lesezeit/Satz die minimale Geradenlänge

$$s_{\min} = t_L \cdot v_T = 0{,}15\,\text{s} \cdot 0{,}083\,\text{m/s} \triangleq 12{,}5\,\text{mm} \tag{5.26}$$

und der minimale Kreisbogen mit 30 + 12 (Mittelpunkt) Z/Satz

$$b_{\min} = \frac{42}{200} \cdot \frac{5}{60} = 17{,}5\,\text{mm}. \tag{5.27}$$

Man muß daher die Geschwindigkeit verringern, wenn die Stützpunktabstände geringer sind.

Die Zwischenspeicherung der Eingabedaten erfolgt in den Registern *R1* bis *R4* (s. Bild 5.83, S. 214), die von Produkten in *R9*.

5.8.3.2. *Werkzeugkorrektur*

Die Werkzeugkorrektur berücksichtigt die Werkzeugabmessungen voll oder nur ihre Abweichung gegenüber im Programm enthaltenen Nennmaßen. Eine sprungartige Beaufschlagung des Lageregelkreises, die den Geschwindigkeitsregelkreis voll aufsteuert und damit eine hohe dynamische und elektrische Belastung verursacht, vermeidet man, wenn man die mit der Korrektur verbundene Positionierung durch lineare Interpolation stetig gestaltet.

Eine Werkzeuglagekorrektur ist notwendig, wenn Istwert und Sollwert der Werkzeugschneide nicht übereinstimmen. Eine Korrektur nur in Richtung der Werkzeuglängsachse (z.B. Bohrerlänge) heißt auch Werkzeuglängenkorrektur. Bei Werkzeugwechseleinrichtungen ist Längenkorrektur kaum zu umgehen, will man einfache Programmierung (Satzwiederholung) und technologische Freizügigkeit erhalten.

Die Lagekorrektur erfolgt mit definierter Geschwindigkeit als Bewegungsvorgang am Anfang und als Rückbewegung am Ende der Bearbeitung bzw. bei Werkzeugwechsel als Bewegung in Richtung der Korrekturdifferenz (Bild 5.72):

$$\Delta x_{Kn} = \pm x_{Kn} - (\pm x_{K(n-1)});\ \Delta y \text{ bzw. } \Delta z$$

entsprechend. Dabei wird mit $x_{Kn} = 0$ in die Ausgangslage zurückgefahren (Endkorrektur!).

Dazu wird der Endwert der Geraden AB in den Interpolator eingeschrieben und diese Gerade verfahren (NC 450 und NC 430). Im Gegensatz dazu wird bei der NC 470 der Korrekturwert im Positionier-Rechenprogramm verarbeitet.

Bei der Werkzeugdurchmesserkorrektur dagegen ist die Fräsermittelpunktbahn ständig in Normalenrichtung als Äquidistante zur Werkstückkontur zu verschieben.

Erfolgt nur Differenzkorrektur $\Delta r = r_{Ist} - r_{Soll}$ nach Bild 5.73, muß bereits eine Äquidistante programmiert werden.

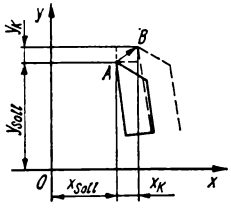


Bild 5.72. Werkzeuglagekorrektur

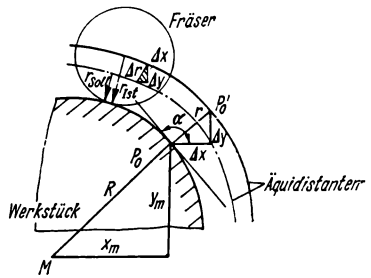


Bild 5.73. Werkzeugdurchmesserkorrektur ▶

Die wegen der einfacheren Bedienung bevorzugte Durchmessereingabe bedingt eine Division zur Radiusermittlung nach den beiden Methoden:

- Division innerhalb des Rechenwerks durch Stellenverschiebung der Dualzahl oder
- Halbierung der Richtungswerte in der äußeren Datenverarbeitung $\left(d \cdot \frac{\sin \alpha}{2} = \frac{d}{2} \sin \alpha\right)$.

Der Korrekturbereich wird üblicherweise beschränkt (bei NC 450 auf $\pm$ 300 mm), bei größerem Werkzeugdurchmesser muß eine Äquidistante programmiert werden.

Bei Drehmaschinen lassen sich die Schneidenradien bei nichtpunktförmigem Werkzeug in gleicher Weise kompensieren, indem die um den Schneidenradius versetzte Äquidistante errechnet wird (Bild 5.74).

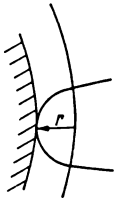


Bild 5.74. Drehmeißelkorrektur

Dient zur Beschreibung der Kurve eine Menge von Kurvenpunkten, ist diese unter Beachtung der gleichfalls im Programm einzugebenden Korrekturrichtung durch Addition der achsparallelen Anteile $\pm \Delta x$ und $\pm \Delta y$ (Bild 5.78) zu variieren. Diese entstehen durch Multiplikation des Radius bzw. der Radiusdifferenz mit dem Sinus bzw. Kosinus des Richtungswinkels der Tangente bzw. Normalen.

Sehr häufig – so auch bei der Bahnsteuerung NC 450 – erfolgt die Beschreibung der Bahn durch

- Koordinaten des Kreismittelpunktes, bezogen auf den Anfangspunkt des Kurvenstücks
- Endpunktkoordinaten, bezogen auf den Anfangspunkt des Kurvenstücks
- Kurventypbeschreibung (Gerade, Kreis)
- Durchlaufsinn.

Aufgabe der Korrekturrechnung ist es nun, die Anfangs- und Endpunktkoordinaten eines jeden Interpolationsabschnitts vor Ausführung der Interpolation so zu korrigieren, daß die interpolierten Kurvenpunkte auf der Äquidistanten liegen. Diese beiden Korrekturen genügen, da die Äquidistanten beim Kreis und bei der Gerade Kurven gleicher Art sind. Tatsächlich ändern sich die Koordinaten $(x_m; y_m)$ und $(x_e; y_e)$, da der auf die Äquidistante verschobene Anfangspunkt wieder P_0 (0; 0) sein soll. Drei Schritte sind nötig:

- Ermittlung der Winkelfunktionswerte $\sin \alpha$, $\cos \alpha$
- Multiplikationen $\Delta x = \frac{d}{2} \sin \alpha$; $\Delta y = \frac{d}{2} \cos \alpha$

– vorzeichenrichtige Addition zu x_m, y_m, x_e, y_e, womit lineare Wegkorrektur am Anfang und Ende des Interpolationsabschnitts eintritt. Dabei ist α der Neigungswinkel des Tangentenvektors in positiver Umlaufrichtung an den Kreis gegenüber der positiven x-Richtung.

Für die NC 450 werden die Winkelfunktionswerte von α_0 und α_e in der äußeren Datenverarbeitung ermittelt und im Programm mit vorgegeben. Ihre Errechnung in der Steuerung erfordert Division der x_m- und y_m-Werte zur Bildung des Tangens, verlangt Vorzeichenfestlegungen wegen dessen Periode und zur Umrechnung in die Sinus-Kosinus-Funktion Quadratur und Wurzelziehen bzw. Berechnung von

$$R = \sqrt{x_m^2 + y_m^2} \quad \text{und} \quad \frac{y_m}{R} \quad \text{bzw.} \quad \frac{x_m}{R}.$$

Nimmt man den hohen Aufwand zur Berechnung der Tangenten-Normalen-Richtung in Kauf, reduzieren sich die Aufwendungen in der äußeren Datenverarbeitung und Eingabe, und eine manuelle Programmierung einfacher Fälle wird ermöglicht. Die Richtungswerte der Endpunkte eines Abschnitts sind zu speichern, da diese bei tangentialem Übergang für den folgenden Abschnitt gleichermaßen gelten.

Die Multiplikation muß innerhalb der NC ausgeführt werden, da $\frac{d}{2} = r$ variabel ist. $\frac{d}{2}$ läßt sich bei dualer Zahlendarstellung durch Stellenverschiebung erreichen.

Die 3. Rechnung schließlich ist in einem Addier-Subtrahier-Werk auszuführen.

Obwohl scheinbar die beiden Korrekturen

– Erzeugung der Äquidistante bei programmierter Werkstückkontur

– Korrektur der Äquidistante bei programmierter Äquidistante

gleichartig verlaufen, ergibt sich doch ein grundlegender Unterschied an den Übergangsstellen. Während die Werkstückkontur Ecken aufweisen kann, hat die äquidistante Fräsermittelpunktbahn nur tangentiale Übergänge.

Die Korrektur zu Beginn der Bearbeitung entspricht der Lagekorrektur um r bzw. Δr.

Gemäß Bild 5.75 sind Δx und Δy zu bestimmen, wobei für alle Quadranten dieselben Gleichungen gelten. Eine Kollision Werkzeug – Werkstück schließt einen unkorrigierten Anfangspunkt auf dem Werkstück aus, weshalb die Programme außerhalb beginnen müssen.

Bei der Korrektur ist generell noch zwischen Innen- und Außenbearbeitung bzw. links und rechts zu unterscheiden. Kriterium ist die Verlagerungsrichtung des Werkzeugs bei zunehmendem Werkzeugdurchmesser, bezogen auf die Vorschubrichtung. Beide unterscheiden sich durch Vorzeichentausch an beiden Korrekturvektoren.

Für Rechtskorrektur am Anfang bei positiver Vorschubrichtung gilt

$$\begin{aligned} \Delta x_0 &= r \sin \alpha_0 \\ \Delta y_0 &= -r \cos \alpha_0 \end{aligned} \qquad \alpha_0 \text{ gegen positive } x\text{-Richtung gemessen.} \tag{5.28}$$

Durch Vorzeichentausch wird die Endkorrektur erwirkt.

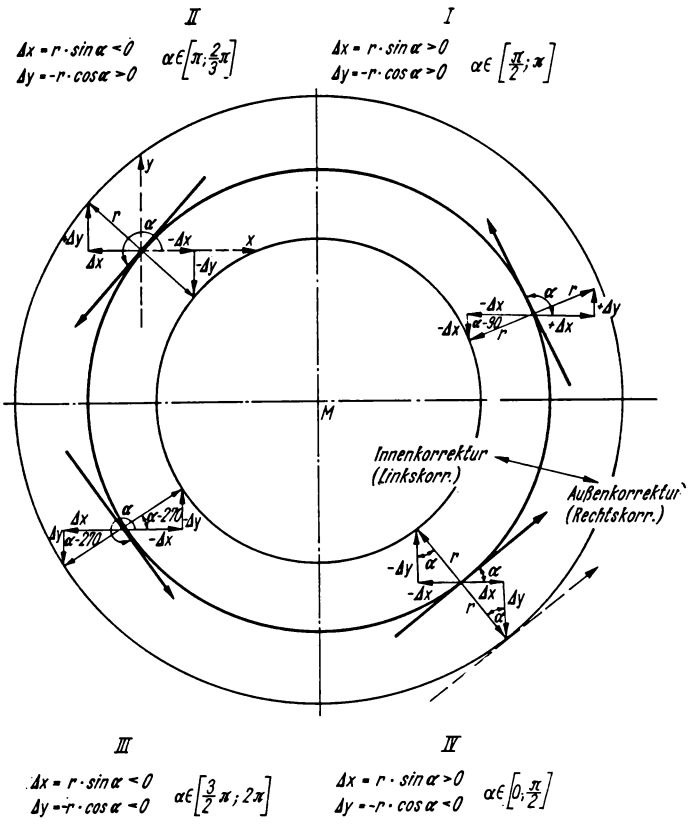


Bild 5.75. Werkzeugkorrektur, Korrekturrichtung (Anfangskorrektur)

Mit der Anfangskorrektur $P_0 \rightarrow P_{0k}$ sind die programmierten Koordinaten x_m, y_m und x_e, y_e zu korrigieren. Es leuchtet ein, daß die Mittelpunktkoordinaten nach Bild 5.76 um die negierte Anfangskorrektur zu verändern sind:

$$\left.\begin{aligned} x_{mk} &= x_m - \Delta x_0 = x_m - r \sin \alpha_0 \\ y_{mk} &= y_m - \Delta y_0 = y_m + r \cos \alpha_0 \end{aligned}\right\} \quad \begin{matrix} \text{für Rechtskorrektur,} \\ \text{positiver Umlauf.} \end{matrix} \tag{5.29}$$

Die Endkoordinaten lauten

$$\begin{aligned} x_{ek} &= x_e + \Delta x_e - \Delta x_0 \\ &= x_e + r \sin \alpha_e - r \sin \alpha_0 = x_e + r (\sin \alpha_e - \sin \alpha_0) \\ y_{ek} &= y_e + r (\cos \alpha_0 - \cos \alpha_e) . \end{aligned} \tag{5.30}$$

Fehlt der tangentiale Übergang zwischen den Interpolationsabschnitten, ist die Anschlußkorrektur (Eckenergänzung) als Ergänzungskreis bzw. Geradenver-

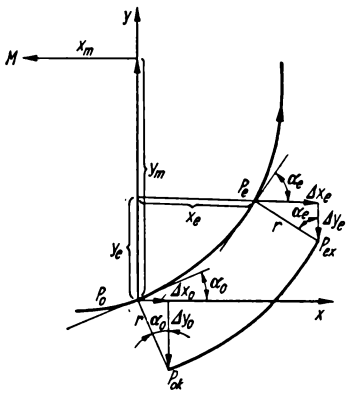


Bild 5.76. Werkzeugdurchmesserkorrektur, Koordinatenveränderung

längerung (Bild 5.77) anzuwenden. Geradenverlängerung in Tangentenrichtung läßt beim Erreichen des Punktes A den Fräser außer Schnitt gehen (Stellung *1*), während er beim Ergänzungskreis im Eingriff bleibt und freischneidet (Stellung *2*).

Bei Geradenverlängerung ist der Punkt C zu ermitteln, um die Strecken $\overline{AC}$ und $\overline{CB}$ in die Bahn einzubauen (Bild 5.78):

$$\triangle ACD \cong \triangle CBD$$

$$\overline{AC} = \overline{CB} = r \tan \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2}. \tag{5.31}$$

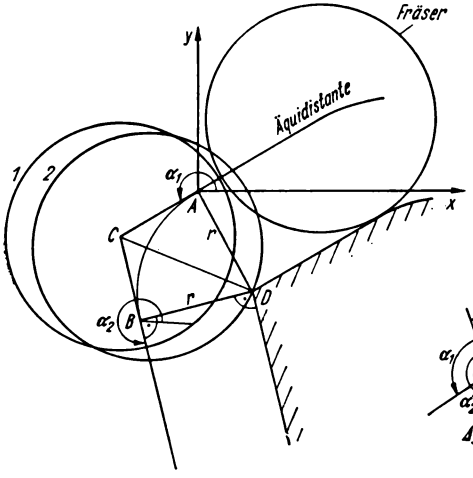


Bild 5.77. Anschlußkorrektur

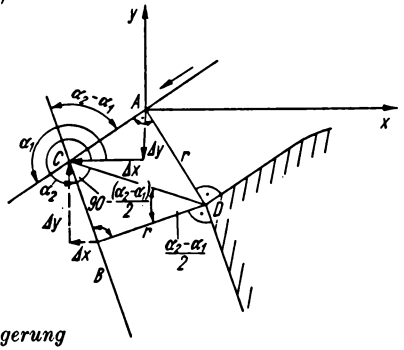


Bild 5.78. Geradenverlängerung

Die so erzielte Endpunktkorrektur $A \rightarrow C$ verlangt noch die Richtungszerlegung in

$$\begin{aligned} \Delta x &= \pm r \tan \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2} \cos \alpha_1 \\ \Delta y &= \pm r \tan \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2} \sin \alpha_1 . \end{aligned} \tag{5.32}$$

Analog verläuft die Anfangspunkt-(bzw. Mittelpunkt)-Korrektur $B \rightarrow C$ mit α_2 und vertauschten Winkelfunktionen.

Man erkennt den erheblichen Rechenaufwand, selbst wenn die Winkelfunktionswerte im Programm eingegeben werden.

In der NC 450 wird deshalb mit dem Ergänzungskreis (Bild 5.79) gearbeitet. Die Mittelpunktkoordinaten des Kreisbogens $\overset{\frown}{AB}$ sind durch die Endpunktkorrektur des ersten Abschnitts festgelegt.

$$\begin{aligned} x_m &= - r \sin \alpha_1 \\ y_m &= \quad r \cos \alpha_1 . \end{aligned} \tag{5.33}$$

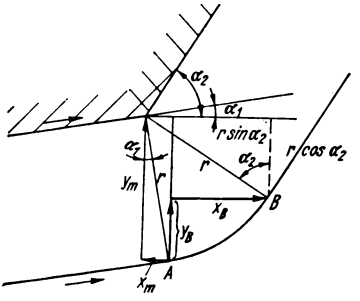


Bild 5.79. Ergänzungskreis

Die Koordinaten des Endpunktes B, bezogen auf den Anfangspunkt A als Ursprung, lauten

$$\begin{aligned} x_B &= r \, (\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1) \\ y_B &= r \, (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2). \end{aligned} \tag{5.34}$$

Das Freischneiden kann bei erforderlicher scharfer Kante vermieden werden, wenn eine Äquidistante mit Eckenergänzung programmiert und diese korrigiert wird.

5.8.3.3. *Umrechnung von Bezugs- auf Kettenmaß*

Durch die Festlegung, den Endpunkt eines Interpolationsabschnitts zum Koordinatenursprung für den nächsten Abschnitt zu machen, ist Kettenvermaßung nötig.

Soll im Bezugsmaßsystem eingegeben werden, ist gemäß Gl. (5.35) und Bild 5.80 umzurechnen:

$$\begin{aligned} \xi_{e2} &= x_{e2} - x_{e1}; \quad \eta_{e2} = y_{e2} - y_{e1} \\ \xi_{m2} &= x_{m2} - x_{e1}; \; \eta_{m2} = y_{m2} - y_{e1} \end{aligned} \tag{5.35}$$

x_{ei-1} und y_{ei-1} sind zusätzlich zu speichern.

Im Programm ist Wechsel von Bezugs- auf Kettenmaß möglich, der umgekehrte Wechsel verbietet sich von selbst.

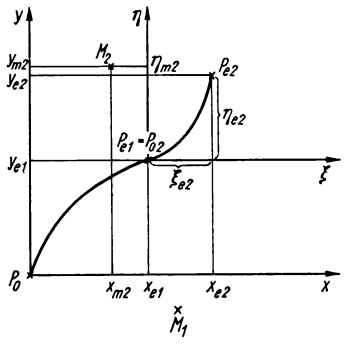


Bild 5.80. Zur Umrechnung von Bezugs- auf Kettenmaß

5.8.3.4. *Nullpunkttransformation*

Die NC wird bei Bearbeitungsbeginn am Werkstück- gleich Programm-Nullpunkt genullt. Mit Vorwahlschaltern (oder auch programmiert) kann dieser Nullpunkt um eine Transformationsstrecke verschoben werden, um dort beginnend ein zweites Werkstück zu bearbeiten. Das entspricht der Werkzeuglagekorrektur für 6 Dekaden.

5.8.3.5. *Tischumschlagbearbeitung*

Für die im Abschn. 5.7.5.3. erläuterten Berechnungen bei Tischumschlagbearbeitung (Bild 5.81) dient der Koordinatenrechner:

$$\begin{aligned} x_T &= \pm (A \pm B) \text{ bei } 90°\text{- und } 270°\text{-Lage bzw.} \\ x_T &= \pm (A + A) \text{ bei } 180°\text{-Lage.} \end{aligned} \tag{5.36}$$

Als Ergebnis wird die Transformatorenstrecke mit Interpolator verfahren. Bei den von 0° abweichenden Tischstellungen gilt

90°: $X \to + \eta$; $Y \to - \xi$

180°: $X \to - \xi$; $Y \to - \eta$

270°: $X \to - \eta$; $Y \to + \xi$

(Drehung entgegen dem Uhrzeigersinn).

5.8.3.6. *Gewindeschneiden mit Interpolator* [5.33]

Bahngesteuertes Gewindeschneiden erfordert in kartesischen Koordinaten dreidimensionale (z.B. bei Fräsmaschinen), in Polarkoordinaten zweidimensionale

Interpolation. φ beschreibt die Rotation um die Gewindeachse (z.B. bei Drehmaschinen) und r die Bewegung in Richtung der Gewindesteigung. Variable Steigung ist programmtechnisch zu realisieren. Die Gewindeform wird vom Werkzeug bzw. durch Schnittversatz erreicht.

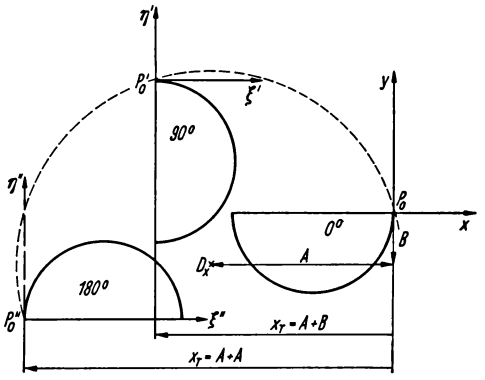


Bild 5.81. Tischumschlag

Während bei Schleif- und Fräsmaschinen keine Veränderung der Bahnsteuerung erforderlich ist, liegen andere Verhältnisse bei Drehmaschinen vor, weil dort die rotatorische Achse von der Hauptspindel gebildet wird. Diese Achse entzieht sich meist einer ökonomischen Lageregelung (z.T. Getriebe), so daß sie in Anlehnung an Kopierbearbeitung zur Leitachse bestimmt werden muß. Das bedeutet, der Vorschub $= f(\omega)$ statt Vorschub $= f(t)$. Die zeitproportionale Taktung wird durch eine von ω abhängige Impulsfolge ersetzt, wozu sich ein Impulsgeber anbietet, der mit der Hauptspindel meist über Getriebe wegen des Stangendurchlasses gekoppelt wird. Der Interpolator gibt bei jeder Anregung eines Interpolationszyklus einen Vorschubimpuls aus, woraus die maximale Gewindesteigung $W_{max} = i \cdot \Delta s = 4000 \cdot 0{,}01 = 40$ mm/U bei Impulsvervierfachung und IGR 1000 folgt. Liegen die Steigungen höher, sind die Genauigkeitsforderungen geringer und $\Delta s' = 4\,\Delta s$ (bei $\omega_{max} = 160$ mm) möglich, woraus der im Abschn. 5.8.1. erwähnte Teiler 1 zu 4 folgt. 4 Umläufe je Anregeimpuls (*Tz31* → *Tz127*) entsprechen 4 Vorschubimpulsen je Hauptspindelimpuls. Aufruf dazu G07.

Aus der Geschwindigkeit des Interpolators (1 Zyklus $\triangleq$ 16 µs) errechnet sich die maximale Hauptspindeldrehzahl zu

$$n_{max} = \frac{60}{16 \cdot 10^{-6} \cdot 4000} = \underline{940\ \text{min}^{-1}}.$$

Aufgabe des Interpolators ist es, bei $n < n_{max}$ nur einen Teil der Geberimpulse i an den Vorschubregelkreis zu leiten, d.h., gleichmäßig verteilte Impulse auszu-

blenden. Man denke sich eine zu interpolierende schräge Gerade $\overline{AB}$ nach Bild 5.82, für die gilt

$$i \Delta s = i_x \Delta s + i_z \Delta s \text{ (Interpolationsalgorithmus)} \tag{5.37}$$

$$i_x = i - i_z$$

mit $i_z = W \Delta s$ ($\triangleq$ 1 Gewindegang)

folgt $i_x = i - W \Delta s$, (5.38)

d.h. Geberimpuls minus Steigung.

Gibt man die i_x nicht aus und leitet die i_z, gleichmäßig verteilt, in z-Richtung an den Vorschub, entsteht ein zylindrisches, sonst ein konisches Gewinde.

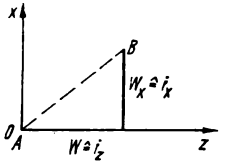


Bild 5.82. Gewindeschneiden

Variation der Steigung (Befehle G 34, G 35) erfordert bei jedem Gewindegang neue Daten und erhebliche Eingabefrequenz. Wird W nur am Anfang und Ende angegeben, muß gleichmäßig über der Länge variiert werden:

$$W_n = W_{n-1} \pm 1 \Delta s. \tag{5.39}$$

In der NC würde $l' = \dfrac{l}{(W_0 - W_e)\,100}$ zu bilden sein, um den Längenabschnitt für $\pm$ 1 Δs zu ermitteln. Diese Aufgabe liegt besser in der äußeren Datenverarbeitung.

Man gibt ein

- Steigung am Anfang: Adresse W
- Gewindelänge, nach der Gl. (5.39) erfüllt ist: Adresse C
- Gewindelänge l: Adresse Z.

Man berechnet am Anfang $i - W$ und verändert W und diese Differenz mit jeder Ausgabe Δs gegensinnig.

Mittels Ein-Impuls-Schaltung wird vom Nullimpuls des Meßsystems die Umschaltung $v = f(\omega) \leftrightarrow v = f(t)$ vorbereitet.

5.8.3.7. *Feste Zyklen*

Bahnsteuerungen müssen auch für Punkt-Strecken-Steuerungsprobleme vorteilhaft einsetzbar sein, da ein Maschinenwechsel nach Abarbeitung der Bahnkurven meist nicht sinnvoll ist. Daher sollen analog Abschn. 5.7.5.4. Bohrprogramme ohne erheblichen Aufwand aufrufbar sein. Vorzusehen sind die Zyklen G 81, G 82 (Bohren), G 84 (Gewindeschneiden), G 85, G 86, G 89 (Aufbohren).

Die Wegbeträge der Bohrachse (meist Z) werden doppelt in den Endpunktregistern gespeichert und mit unterschiedlichem Vorzeichen verarbeitet.

Die Bahnsteuerung NC 450 gibt für 100 ms die Befehle „Verweilzeit", Drehrichtung, Hauptspindel „Stopp" aus.

5.8.3.8. *Koordinatenrechenwerk*

Das Koordinatenrechenwerk (Bild 5.83) muß multiplizieren, addieren und subtrahieren können.

Bei der Addition bringt die serielle Verarbeitung dualcodierter Zahlen (keine Korrekturrechnung) den geringsten Aufwand, so daß bei NC 450 ab der Addition im Rechner bis zum Interpolator dual gearbeitet wird.

Die Geschwindigkeit läßt sich nur mit Parallel- oder serien-parallelen Rechenwerken erhöhen, wobei die Notwendigkeit eines eventuellen Übertrags durch n–1 Stellen einen zusätzlichen Zeitanteil $\left(\frac{n-1}{n}\right)$ ergibt. Bei getakteten Systemen tritt nur dann eine Verlängerung ein, wenn Laufzeit > Taktzeit und eine Zerlegung in mehrere Stufen notwendig wird. Es hat nicht an Versuchen gefehlt, diese Zeit auf Kosten der Ökonomie zu verringern [2.8] [2.9] [2.12].

Die Multiplikation kann sowohl tetradisch als auch dual, d.h. vor oder nach der ohnehin nötigen Konvertierung, ausgeführt werden. Die Multiplikation wird mit n-stelligen Winkelfunktionswerten < 0 ausgeführt, wodurch das Produkt noch mit 10^{-n} zu multiplizieren ist. Diese Division, dual ausgeführt, erfordert ein vollständiges Dividierprogramm (s. Abschn. 2.4.4.3.), dagegen führt sie im Dezimalsystem zu einer Stellenverschiebung, wodurch dem tetradischen Multiplizierwerk der Vorzug zu geben ist.

Die Multiplikation erfolgt tetradisch-seriell. Das Register MR ist wieder frei, ehe die nächste Stelle gelesen wird und kann daher als 4-bit-Schieberegister-Rückwärtszähler (s. Abschn. 5.6.3.) ausgebildet werden. Mit jeder Addition wird sein Inhalt um 1 erniedrigt (Faktorzähler).

Als Multiplikationszeit bei serieller Arbeitsweise ermittelt man 3078 µs. Unter dem Summenzeichen steht die Einsparung bei Vernachlässigung von Stellen des Produkts.

$$t = 9\left[mn - \sum_{k=1}^{m+n-p} k\right] t_{\mathrm{Add}} \tag{5.40}$$

$$= 9\left[5 \cdot 5 - \sum_{1}^{3} k\right] 18 = 3078\ \mu\mathrm{s};$$

m Stellenzahl $MD = 5$
n Stellenzahl $MR = 5$
p Stellenzahl des Produkts = 7
k natürliche Zahl,

mit t_{Add} = (4 Rechenbit + 4 Korrekturbit + 1 Prüfbit) × 2 µs/bit = 18 µs/Tetrade.

Trotz des geringen Aufwands an Addern wird der Aufwand zur Steuerung des Datentransfers erheblich.

Die Rechenzeiten für Serien-Parallel-Verarbeitung (innerhalb Tetrade seriell, Tetraden parallel) – wie in NC 450 ausgeführt – und für Parallel-Serien-Verarbeitung (innerhalb der Tetrade parallel, Tetraden seriell) liegen bei

$$t_{sp} = 9\,n\,t_{\mathrm{Add}} = 9 \cdot 5 \cdot 10 = 450\ \mu\mathrm{s} \text{ mit } t_{\mathrm{Add}} = 5 \cdot 2 = 10\ \mu\mathrm{s}$$

$$t_{ps} = 9\left(mn - \sum_{1}^{m+n+p} k\right) t_{\mathrm{Add}} = 9\,(5 \cdot 5 - 6) \cdot 6 = 1026\ \mu\mathrm{s}$$

mit t_{Add} = (1 Rechenbit + 1 Korrekturbit + 1 Prüfbit) × 2 µs/bit = 6 µs.

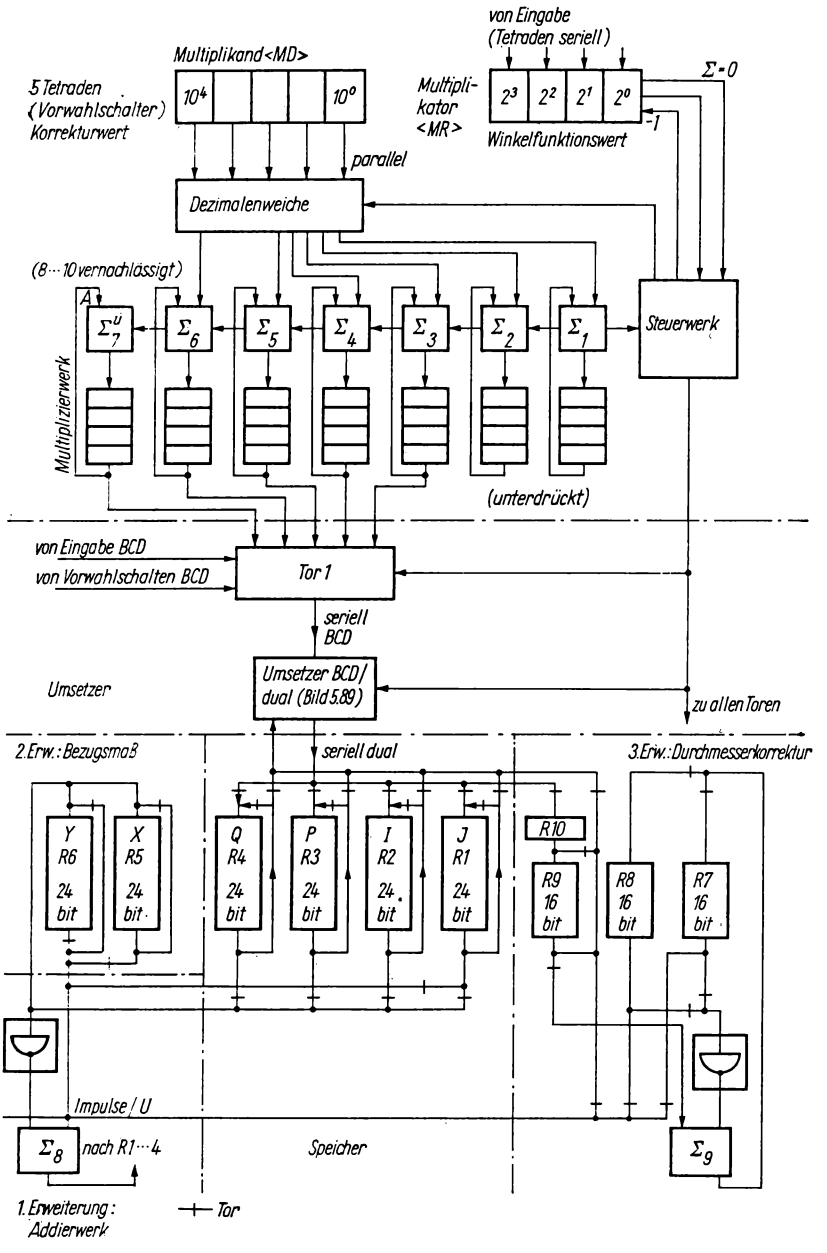


Bild 5.83. Koordinatenrechenwerk

Die Halbierung Durchmesser → Radius erfolgt nach der Konvertierung ins Duale durch Stellenverschiebung.

In der Dezimalenweiche wird die Zuordnung der Korrekturschalter zu den Addern so vorgenommen, daß die Stellenverschiebung gemäß Rechenalgorithmus (Abschn. 2.4.5.4.) erfolgt. Der Adder *7* speichert nur die höchstwertigen Überträge.

Bei zwei 5stelligen Faktoren entsteht ein 10stelliges Ergebnis, das durch Vernachlässigung auf 7 und durch Unterdrückung auf 5 Stellen reduziert wird (s. Fehlerbetrachtung am Schluß dieses Abschnitts). Zur seriellen Addition s. Abschn. 5.7.2.

Tor *1* lenkt die Eingabeinformation über den Umsetzer nach *R1* bis *R4*, das Produkt nach *R9*.

Die BCD-dual-Umsetzung (Bild 5.84) arbeitet gemäß Abschn. 2.4.1. seriell. Der Multiplikator 10 = L 0 L 0 erfordert 3 Stellenverschiebungen, die durch 3 an das MD-Register angehängte genullte Speicherplätze ermöglicht werden (*FF1* bis *3*).

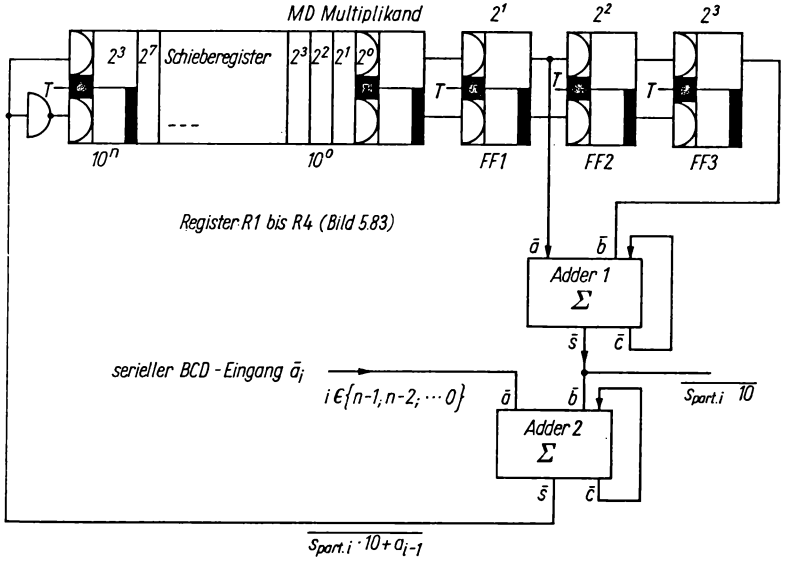


Bild 5.84. Umsetzer

Im Adder *1* wird die Multiplikation der Partialsummen

$$[(a_{n-1}\ \ 10 + a_{n-2}) \cdot 10 + a_{n-3}] \cdot 10 \cdots \tag{5.41}$$

ausgeführt. Zur Multiplikation mit 10 entnimmt man den Multiplikanden um eine Stelle verschoben am Speicher *FF1* und um drei Stellen verschoben an *FF3* noch einmal und addiert beide. Zu diesem Produkt wird die nächste Tetrade sofort im Adder *2* hinzuaddiert und diese Summe wiederum abgespeichert. Für jede Tetrade ist somit ein voller Umlauf nötig.

Als Register wird das der Adresse sowieso zugeordnete *R1* bis *R4* (Bild 5.83) verwendet, und der Umsetzer erhält nur die zusätzlichen 3 Speicherstellen, die 2 Adder sowie eine Rückführung der Ausgänge des Registers.

Nachgeschaltet ist das ausbaufähige Addierwerk, dessen Grundvariante *R1* bis *R4* die Speicherfunktionen P, Q $(= x_E, y_E)$; I, J $(= x_M, y_M)$ erfüllt.

Die Information wird den Schieberegistern seriell entnommen. Die Weitergabe an den Interpolator erfolgt, von diesen angeregt, für alle 4 Register gleichzeitig.

Die erste Erweiterung läßt mittels Serienvolladder *8* die Rechenoperationen Addition/Subtraktion für

Werkzeuglagekorrektur
Nullpunkttransformation
Tischumschlag
Gewindeschneiden

zu, die keine zusätzlichen Speicher benötigen.

Die Bezugsmaßeingabe benötigt als zweite Erweiterung 2 Speicher X, Y für Werte des vorangegangenen Interpolationsabschnitts.

Erst die dritte Erweiterung erfüllt die Durchmesserkorrektur. *R7* und *R8* speichern die Produkte aus dem vorherigen Interpolationsabschnitt, z.B. $r \cdot \sin \alpha_0$ Gl. (5.30), *R9* dient als Umsetzerregister für die Werte des Multiplizierwerks, z.B. $r \cdot \sin \alpha_e$. Die Differenz wird im Adder *9* ermittelt, die Addition zu x_e bzw. y_e im Adder *8*. Die Speicherkapazität beträgt 15 bit [$\approx$ 30000 Einheiten $\triangleq \frac{d}{2} (\sin \alpha_0)_{max}$].

R10 ist die Erweiterung auf $(n + 3) - 1 = 15 + 3 - 1 = 17$ Stellen, womit die letzte Ziffer unterdrückt und somit die Division $d/2$ erfolgt ist.

Nur *R9* wird parallel gelöscht (Zeit!), alle anderen werden leergeschoben, wobei *R5* bis *R8* nur am Programmanfang genullt werden dürfen. Ihr Inhalt muß zur Anschlußkorrektur und Bezugsmaßverarbeitung erhalten bleiben.

Fehlerbetrachtung

- Quantisierungsfehler $F_1 \leqq \pm$ 1 digit
- Stellenunterdrückung $F_2 \leqq$ Stellenwert der kleinsten verbliebenen Ziffer. Dieser wird auf 0,5 F_2 durch Rundung verringert, durch Unterdrückung von 2 Stellen $(7 \rightarrow 5)$ wird $F_2 \leqq 1$ RE (Recheneinheit)
- Vernachlässigungsfehler bei Multiplikation/Division durch Fehlen von Speicherkapazität $(< m + n)$

$$F_3 \leqq 9 \sum_{k=1}^{i} k \cdot 9 \cdot 10^{k-1}; \tag{5.42}$$

i Anzahl der vernachlässigten Stellen.

Er wird bei 4 vernachlässigten Stellen und 5stelligen Faktoren $(m = n = 5)$

$$F_3 \leqq 9\,(4 \cdot 9 \cdot 10^3 + 3 \cdot 9 \cdot 10^2 + 2 \cdot 9 \cdot 10^1 + 1 \cdot 9) \cdot 10^{-5}$$
$$= 3{,}5 \text{ RE (zu groß)},$$

bei nur 3 vernachlässigten Stellen entfällt der erste Summand und $F_3 \leqq 0{,}26$ RE.

- Faktorenfehler $a \cdot b = c$

$$F_4 = |\Delta c| = a\,|\Delta b| + b\,|\Delta a| \text{ [2.13]} \tag{5.43}$$

Bei einer Quantisierung des Tangentensteigungswinkels in 0,1°- bzw. 0,05°-Einheiten und Bestimmung der Winkelfunktionswerte entsteht ein zu großer Rundungsfehler $\Delta b = 8{,}5$ RE [5.32]. Sie ist deshalb auf 0,01° zu verbessern ($\Delta b \leqq 10^{-4}$). Der Werkzeugdurchmesserfehler muß ebenfalls $\Delta a \leqq 1$ RE sein.

Faktorenfehler bei 4stelligen Winkelfunktionen

$$F_4 \leqq 30000 \cdot 10^{-4} + 0{,}9999 \cdot 1 \approx 4 \text{ RE},$$

bei 5stelligen wird

$$F_4 = 30000 \cdot 10^{-5} + 0{,}99999 \cdot 1 = 1{,}3 \text{ RE}.$$

$$F_{\text{Produkt}} \leqq F_1 + F_2 + F_3 + F_4$$
$$= 1 + 1 + 0{,}26 + 1{,}3 = 3{,}56 \leqq 4 \text{ RE}.$$

Die Halbierung zum Radius erfolgt erst nach der Multiplikation, wodurch zwar ein Unterdrückungsfehler bei ungeraden Zahlen von 0,5 RE entsteht, der Gesamtfehler aber reduziert wird auf $F_{\text{gesamt}} = \frac{4}{2} + 0{,}5 = \underline{2{,}5 \text{ RE}}$.

5.8.4. Geschwindigkeitssteuerung

5.8.4.1. *Geometrische Stufung* [5.34]

Die in TGL 200-0863/06 festgelegten Codierungen der Vorschubreihe R20 ergeben mit $v_{\max} = 5$ m/min (Schlüsselzahl 94) ein $v_{\min} = 0{,}11$ m/min. Der Zeitparameter ist eine stabilisierte Führungsfrequenz.

Durch die Viertelung der Interpolationsschritte (s. Abschn. 5.8.2.2.) wird für die Ausgabe von 1 Δs bei 4 Zyklen (4·32 Takte) eine Grundfrequenz von

$$f = 500000 \frac{\Delta s}{\text{min}} \cdot \frac{1}{60} \frac{\text{min}}{\text{s}} \cdot 128 \frac{\text{Takte}}{s} \approx 1{,}07 \cdot 10^6 \text{ Hz}$$

nötig, die wegen konstanter Tangentialgeschwindigkeit nach Gl. (2.45) auf $\geqq 1{,}07 \cdot \sqrt{2} = 1{,}51$ MHz → 2 MHz zu erhöhen ist.

Jeweils 20 Schlüsselzahlen (Hauptwerte, Tafel 2.7, s. S. 73) weisen gleiche Ziffernfolge auf, da die geometrische Folge $x_k = x_1 \varphi^{k-1}$ für $k = 21$ und den Stufensprung $\varphi = \sqrt[20]{10}$ auf eine Potenz von 10 führt. Alle 6 Stufen ($\varphi^6 \approx 2$) verdoppeln sich die Werte, was die Grundlage eines Frequenzteilers (Bild 5.85) mit der Grundstufe 32:1 bei 1,51 MHz bzw. 42:1 bei 2 MHz Grundtaktfrequenz bildet. Der Teiler wird mit $\varphi = 1{,}12$ abgestuft auf 42:1; 47:1; 53:1; 59:1; 66:1 und 75:1. Der Gesamtbereich ergibt sich durch Multiplikation mit 0,5, 2, 4 und 40.

Beim Erreichen der aufgerufenen Zahl wird der Teiler zur Impulsweitergabe und gleichzeitiger Rückstellung angeregt. Die 6 Grundteiler liegen parallel, die übrigen in Reihe.

Im Takt $n - 2$ (z.B. 40) hat *G1/8* = 0. Im Takt $n - 1$ wird das FF gesetzt und *G8* gibt bei Takt n einen Impuls ab.

Durch die Rundung des Teilers erhält man einen Fehler von $|\Delta v| \leqq 2{,}03\%$, der mit dem Fehler der Konstantgeschwindigkeit $F_{\text{ges}} = -2{,}1\%$ bis $+4{,}35\%$ ergibt. Wegen des I-Anteils der Lageregelung ist dies der maximal mögliche Fehler (s. a. TGL 12118).

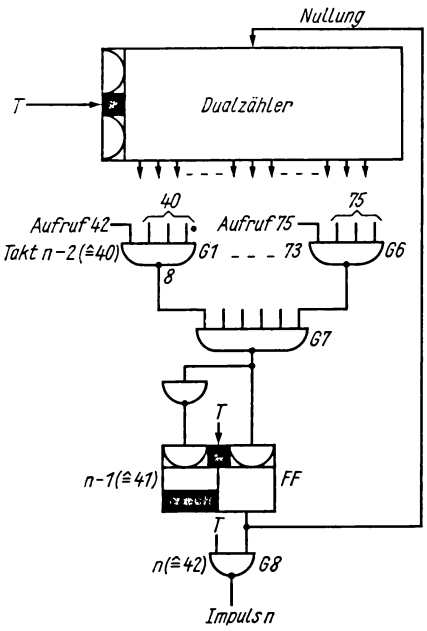


Bild 5.85. Frequenzteiler

Vorschubreduzierung ist zum Ausregulieren von vorher nicht zu bestimmenden technologischen Bedingungen nötig, z.B. Materialhärte. (Erhöhung ist nicht möglich, da die Maximalfrequenz ausgeschöpft ist.) Es wird bei einer Stufung von 5% (Bereich 55 bis 100%) nochmals eine durch Schalter aufrufbare Frequenzteilung 20:19; 20:18 usw. bis 20:11 gleicher Art nachgeschaltet.

Durch Veränderung der Teiler ließe sich Frequenzerhöhung auf 2:1,51 = 1,33 erreichen. Geschwindigkeitserhöhung kann jedoch zur Überlastung der Maschine bzw. des Werkzeugs führen.

5.8.4.2. *Direkte Vorschubprogrammierung*

Durch Modifikation der Geschwindigkeitssteuerung wird direkte Vorschubprogrammierung [5.35] in mm/min (bzw. dem 10^k-fachen) erreicht.

Vom Steuerwerk werden Impulse zur Anregung eines Interpolatorumlaufs (NC 450) bzw. als Vorschubimpulse (NC 430) ausgegeben. Dem Vorhaben liegt folgende Gleichung zugrunde:

$$n = \frac{60 f}{TZ v} = \frac{A}{v}; \tag{5.44}$$

f Grundtaktfrequenz s^{-1}

TZ Anzahl Taktzählerstellungen je Umlauf

v direkter Vorschubwert Inkr./min

n Anzahl der Rechenumläufe zwischen zwei Impulsausgaben $\triangleq$ Untersetzungsteiler, proportional der Vorschubzahl.

Berücksichtigt man die Teiler 1:4 und $1:\sqrt{2}$ (konstante Vorschubgeschwindigkeit), wird

$$A = \frac{60 \cdot 2 \cdot 10^6}{32 \cdot \sqrt{2} \cdot 4} = 662810 \text{ Inkr./min.} \tag{5.45}$$

Bei der Quantisierung von v mit 10 Inkr./min wird $A = 66281$. Rundung auf $A = 66048 = 2^{16} + 2^9$ gibt einen Fehler von — 0,35%, jedoch den Vorteil einer Dualzahl mit wenigen Ziffern „L". Der Gesamtfehler wird $|\Delta v| \leqq 1{,}52\,\%$ [5.36].

Die Konstante A entspricht der maximal möglichen Vorschubfrequenz ($A/v = 1$), d.h., nach 4 Taktzählerumläufen wird 1 Impuls ausgegeben,

$$v_{max} = 66048 \cdot 1{,}0 \text{ mm/min} \approx 6{,}6 \text{ m/min.} \tag{5.46}$$

Die Vorschubbeeinflussung bis 120% senkt v_{max} auf 5,5 m/min.

Gl. (5.44) wird in eine fortlaufende Subtraktion $\langle A \rangle - v \rightarrow \langle A \rangle$ auf

$$A - k\,v \lessgtr 0 \tag{5.47}$$

zurückgeführt, die für $k \geqq n$ das Ergebnis $A - k \cdot v \leqq 0$ liefert. Solange $A - k\,v \geqq 0$, entsteht ein Übertrag, der bei $A - k \cdot v < 0$ verschwindet, wodurch ein Vorschubimpuls ausgegeben und wieder der Wert A eingeschrieben wird.

Ist das Ergebnis erst nach $(n + 1)$ Umläufen negativ, entsteht beim Löschen der beträchtliche Rundungsfehler in der Größenordnung von v. Wird der Registerinhalt in den nächsten Zyklus übertragen, wird dieser Fehler eliminiert.

Zum Beispiel: $v = \frac{1}{3} A$

1. $A - \frac{1}{3}A = \frac{2}{3}A$	4. $0 - \frac{1}{3}A = -\frac{1}{3}A \Longrightarrow$	Impuls, Einschreiben von A
2. $\frac{2}{3}A - \frac{1}{3}A = \frac{1}{3}A$	5. $A - \frac{1}{3}A - \frac{1}{3}A = \frac{1}{3}A$	
3. $\frac{1}{3}A - \frac{1}{3}A = 0$	6. $\frac{1}{3}A - \frac{1}{3}A = 0$	usw. aller 3 Umläufe 1 Impuls

Die Vorschubbeeinflussung wirkt auf die Größe A ein, die in 20 Stufen von 10···120% multiplikativ variiert werden kann.

5.8.4.3. *Abwandlung zur Streckensteuerung NC 430 mit Bahncharakter*

Das Grundprinzip von Gl. (5.44) bleibt erhalten [5.36]. Man führt die direkt programmierte Vorschubgeschwindigkeit einem Register von 24 bit als Dualzahl zu, die Zahl A wird im Taktsteuerwerk gebildet und ebenfalls in einem Register gespeichert. Sie kann von Hand beim seriellen Einschieben verändert werden, was am einfachsten durch Multiplikation mit 2 erfolgt.

Jeder Nulldurchgang der Subtraktion nach Gl. (5.47) führt zu einem Vorschubimpuls, der gleichzeitig vom 24-bit-Wegregister ein Inkrement abzieht. Von letzterem wird Vor- und Hauptkoinzidenz abgeleitet.

Die Regie führt das Taktsteuerwerk, mit dem 32 Impulse je Zyklus gebildet werden.

Zum Kegeldrehen wird von der Vorschubimpulsfolge für die Leitachse mit einem Frequenzteiler (s. Abschn. 5.8.4.1.) die zweite Achse (Planachse) abgeleitet. Dabei ist das Vorschubverhältnis auf $1:m$ (m ganze Zahl) eingeschränkt.

Doppelter Aufbau der Register und Geschwindigkeitssteuerwerke läßt Simultanverfahren und damit beliebige Kegel zu, wobei wegen der Zeitschachtelung nur $A/2$ über Stellenverschiebung vorzugeben ist.

Die Achssteuerung verteilt die Impulsreihen auf die Ansteuereinheiten (ASE) der Schrittmotoren. Ersetzt man die ASE durch einen mit einer Impulsfolge anzusteuernden Vergleicher mit nachgeschaltetem DA-Wandler und beaufschlagt statt der Schrittmotoren einen Servoregelkreis, nähert man sich dem Lageregelkreis der Bahnsteuerung. In der Fachsprache nennt man diese Anordnung Positionierantrieb.

Mit einer Grundfrequenz von 500 kHz $\triangleq S_0$ können mit adaptiver Regelung bei „Werkzeug außer Schnitt" 4 $S_0 \triangleq 2$ MHz erreicht werden. Der lineare Stellbereich wird gefordert von 0,5 bis $2 \cdot S_0$, wozu im Spannungs-Frequenz-Wandler 2,5 bis 10 V = 0,250 bis 1 MHz umzusetzen sind. Im Bereich 1 bis 2 MHz ist $f = f(U)$ (f hier Frequenz) nicht mehr linear.

Als maximale Vorschubgeschwindigkeit sind erreichbar:

$$v_{\max} = \frac{f_T}{\mathrm{TZ}} = \frac{500000 \frac{1}{\mathrm{s}} \cdot 60 \frac{\mathrm{s}}{\mathrm{min}}}{32}$$

TZ Taktzählerstellungen

$$\approx \underline{940000} \triangleq 10\ \mu\text{-Inkr./min} \triangleq 9{,}4\ \text{m/min}.$$

Bei Schrittantrieben ist die Hochlaufeigenschaft zu beachten. Der Anlauf geschieht mit einem der Start-Stopp-Frequenz entsprechenden Sollwert (2000 I/s $\triangleq$ 1,2 m/min), der weitere Hochlauf kann durch Vorgabe gestufter Sollwerte geführt werden. Alle 16 µs steht dann ein um k Inkremente/min höherer Sollwert an; die Hochlaufkennlinie ist eine Gerade.

Die Hochlaufzeit t_H errechnet sich als Proportion:

$$\frac{t_H}{v_{\mathrm{Eil}} - v_{\mathrm{Vorsch.}}} \approx \frac{t_{\mathrm{TZ}}}{k}$$

k Erhöhung des Vorschubwerts je Taktumlauf in Inkr./min; $k = 2^l$; l ganze Zahl

$$\text{Beispiel: } t_H = \frac{(4{,}8 - 1{,}2) \cdot 10^5\ \text{Inkr./min} \cdot 16\ \mu\text{s}}{8\ \text{Inkr./min}}$$

$$= \underline{7{,}2 \cdot 10^5\ \mu\text{s}}.$$

Minimale Zeiten erreicht man mit exponentiell verlaufender Hochlaufkurve mit variablem k.

Auch Gewindeschneiden ist abgewandelt ohne Interpolator durchführbar. Dabei wird als Konstante A die Geberauflösung an der Hauptspindel i eingegeben, das Vorschub-Register erhält die Steigung h in Inkrementen, das Z-Register speichert die Gewindelänge. Das Verhältnis $n = \frac{i}{h}$ wird wie oben in $i - k\,h \leqq 0$ zerlegt und ebenso behandelt. $h_{\max}$ ist mit $i \cdot 0{,}01$ mm begrenzt, da dann $n = 1$ wird. Das bedeutet bei 1000 Inkr./Umdrehung eine Gewindesteigung von

$\leqq 10$ mm, bei Impulsverdopplung von $\leqq 20$ mm. Durch $f_T = 500$ kHz wird $n \leqq 460\ \text{min}^{-1}$. Das Taktsteuerwerk wird bei jedem Meßsystemimpuls für einen Umlauf gestartet.

5.8.4.4. *Konstante Vorschubgeschwindigkeit*

Die richtungsabhängige Schwankung der Tangentialgeschwindigkeit nach Gl. (2.45) ist technologisch unvertretbar. Außerdem ist der Vorschub an Werkzeugmaschinen in TGL 12118 mit $+ 5\%$, $- 2\%$ von der Nenngeschwindigkeit toleriert. Die Ablauffrequenz des Interpolators muß daher abhängig vom Steigungswinkel beeinflußt werden, indem einzelne Impulse aus der Impulsfolge ausgelöscht werden.

Für jeden Quadranten gilt (Bild 5.86):

$$|v_x| + |v_y| = c\, f_I \tag{5.47}$$

$$\frac{v_y}{v_x} = \tan\alpha = \frac{-x_m}{y_m} \qquad (v_x, v_y \text{ sind vorzeichenbehaftet!})$$

$$v = \frac{v_x}{\cos\alpha} = v_x \sqrt{1 + \tan^2\alpha} = \text{konstant} \tag{5.48}$$

$$v_x + v_x \tan\alpha = v_x (1 + \tan\alpha) = c\, f_I \tag{5.49}$$

Gl. (5.49) dividiert durch Gl. (5.48) ergibt

$$\frac{1 + \tan\alpha}{\sqrt{1 + \tan^2\alpha}} = \frac{c\, f_I}{v} \sim f_I \text{ bei } v = \text{konstant}, \tag{5.50}$$

$$\frac{\sqrt{1 + \tan^2\alpha}}{1 + \tan\alpha} \sim v \text{ bei } c\, f_I = \text{konstant}. \tag{5.51}$$

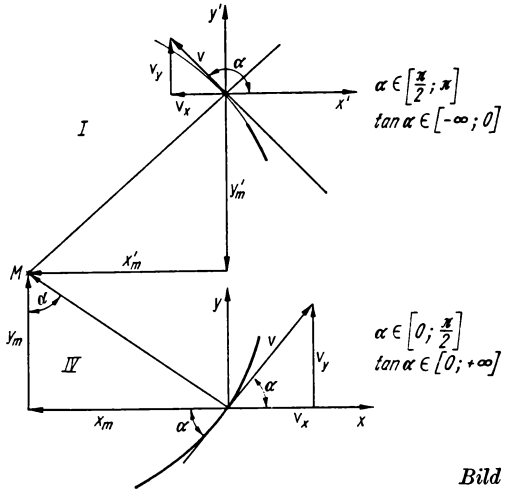


Bild 5.86. Geschwindigkeitszerlegung

Die Eingabe des Steigungswinkels scheidet wegen der Datenmenge aus, und der Algorithmus Gl. (5.50) ist zu aufwendig.

Die stetige Funktion $v = f(\tan \alpha)$, $\tan \alpha \in [0, 1]$, läßt sich durch eine Treppenfunktion so annähern, daß mit

$$\frac{\Delta v}{F_{\text{zul.}}} \cdot 100 = \frac{1 - 0{,}707}{3{,}5} \cdot 100 \approx 9 \text{ Stufen}$$

die zulässige Streuungsbreite von 3,5% als Hälfte der maximal zulässigen Streuung eingehalten wird (+ 2,5%, — 1% gemäß TGL 12118). Gemessen wurde $|\Delta v| \leqq 1{,}1\%$ [5.31].

Der größte Gradient liegt bei $\tan \alpha = 0$, die Abweichung von 2,5% ergibt ein $\tan \alpha \leqq 0{,}01785$ (Bild 5.87). Wir setzen

$$0{,}01785 = \frac{1}{K} = \frac{1}{56} > \frac{1}{63}. \tag{5.52}$$

Mit $\frac{1}{63}$ liegt man im Dualsystem und ist genauer.

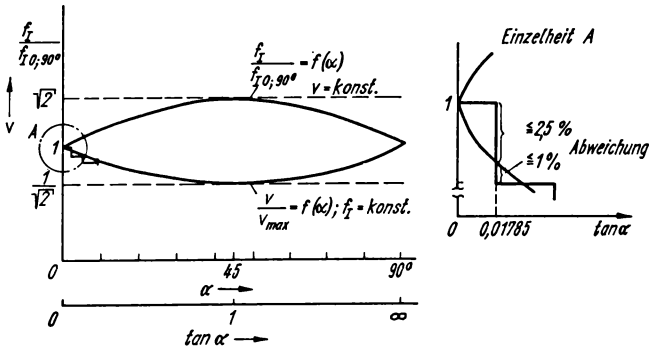


Bild 5.87. Richtungsabhängigkeit der Frequenz bzw. Geschwindigkeit

Tabellarisch [5.37] ergeben sich die diskreten Frequenzänderungspunkte zu $\frac{a}{63}$ mit $a \in \{0, 1, 3, 5, 7, 10, 13, 17, 22, 28, 40, 63\}$. Durch Zählung der a_x und a_y ergibt sich der Quotient $\frac{a_x}{63}$ oder $\frac{a_y}{63}$, je nachdem, ob in x- oder y-Richtung die 63 erreicht wird. Dadurch wird a_x bzw. a_y durch Vergle ich in die Menge $\{a\}$ einrangiert ($a_{x/y} < a_i$) und so eine tan α-Stufe ermittelt. G leichartig ist mit $\cot \alpha = -\frac{y_m}{x_m}$ der Zweig für $\tan \alpha \in (1, \infty)$ aufgebaut (Bild 5.88). Nach jeweils 64 Interpolator-Rechenzyklen steht ein Wert an, so daß strenggenommen die Sekante ermittelt wird.

Als Kriterium für die Brauchbarkeit des Verfahrens ist noch die Krümmung des Kreisbogens einzuführen. $r_{\min}$ ist erreicht, wenn keiner der Stufensprünge ausgelassen wird. Kritisch ist der Beginn der Interpolation in Koordinatenrichtung, d.h., 63 Schritte in einer, 1 Schritt in der anderen Koordinate $\left(\frac{1}{63}\right)$.

Über den Interpolationsalgorithmus ermittelt man $r_{\min} = 2016 \cdot \Delta x$ (Bild 5.89) aus $63^2 + r_{\min}^2 = (r_{\min} + 1)^2$, d.h., $y_m \geqq 2016$, $x_m = 0$ bzw. $x_m \geqq 2016$, $y_m = 0$.

Innerhalb von 63 Schritten in Richtung der Mittelpunktkoordinate erfolgt 1 Schritt in der anderen. Bei $\Delta s = 0{,}01$ mm ist dieser Radius zu groß, weshalb die obenerwähnte Viertelung $\Delta s/4$ als Interpolationsschritt durch Linksverschiebung eingeführt wird. Damit wird $r \geqq 5{,}04$ mm.

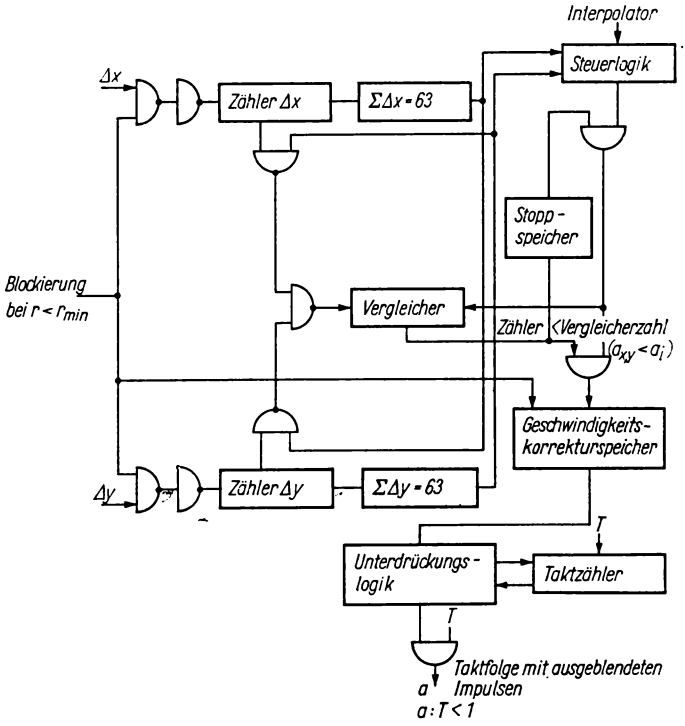


Bild 5.88. Konstantgeschwindigkeitsschaltung

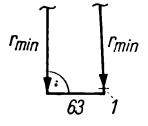


Bild 5.89. Minimaler Krümmungsradius

Bei kleinen Radien (x_m und $y_m < 2^9$, s. Bild 5.65, S. 197) wird auf niedrigsten Vorschub geschaltet, was bei diesen Radien ohnehin nötig ist.

Zur Eckenverzögerung (G 66) werden festprogrammierte Vorschubwerte aufgerufen.

5.8.5. Digitaler Vergleicher [5.38]

Diese Baugruppe erfüllt die Aufgaben

- Synchronisation der Istwertsignale mit dem 500-kHz-Takt des Vergleichers
- Richtungsentscheid (s. Abschn. 5.3.1.2.)
- Ausgabe von Vorzeichen und Zähltaktfolge.

Sie ist die Soll-Ist-Mischstelle im Lageregelkreis (s. Abschn. 6.2.4.). Die Arbeitsweise ähnelt sehr der des Richtungsdiskriminators (s. Abschn. 5.3.1.2.) mit der Korrekturimpulseinblendung nach Abschn. 5.6.1.

$$(\pm\, i_S) - (\pm\, i_I) \rightarrow 0, 1, 2 \text{ Impulse in beide Richtungen.} \tag{5.53}$$

Die Ausgabe keines Impulses tritt bei Gleichnamigkeit der Sollwert- und Istwertimpulse ein (*G1*, *G3* und *G5*), 2 Impulse nur bei Richtungsumkehr, z.B. $(-\, i_S) - (+\, i_I)$ in Nachlaufregelkreisen (*G2*, *G4* und *G5* erster, aus FF zweiter Impuls verzögert). Durch die Teilung 1:4, $f_T \geqq 4\, f_{\text{Eing.}}$, ergibt sich eine einfache Schaltung (Bild 5.90) [5.39].

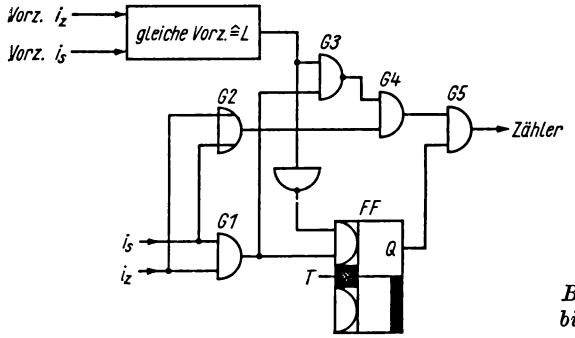


Bild 5.90. Zählimpulsbildung beim Vergleicher

Die Sollwert-Istwert-Differenz wird vom DA-Wandler in die analoge Sollwertspannung umgesetzt. Sie ist identisch mit dem Nachlauffehler bei der Bearbeitung und wird auf 99 Inkremente begrenzt, indem beim Überschreiten der Interpolator vorübergehend gestoppt wird. Bei gekrümmter Bahn führt der Schleppfehler nämlich zu einem Bearbeitungsfehler, so daß die dynamische Güte des Antriebs entscheidend wird.

5.9. Funktionseinheiten zur Informationsausgabe

Informationen werden von der NC als elektrisches Signal, optisches Signal und seltener als akustisches Signal ausgegeben.

5.9.1. Optische Anzeigen

Hierzu zählen Signalleuchten und Ziffern- bzw. Zeichenanzeigeröhren. Signallampen werden mit Lampenverstärker angesteuert (s. Bild 5.93). Bezüglich ihrer Aussage lassen sie sich gliedern in
Warnung: Grenzwerte erreicht

Betriebszustand: Informationsbedarf, Betriebsbereitschaft, Verweilzeit, Achsanzeige, Festwertverrechnung, Vorschubstopp u.ä.
Fehlerangabe: Lochstreifen-, Steuerungs-, Meßsystem-, Leserfehler u.ä.
externe Aktivitäten wirksam: Vorschubbeeinflussung, Nullpunktabgleich, Programmende, externer Abgleich, Informationskorrektur, Hauptsatz, wahlweiser Halt, Satzunterdrückung, Nullen, Tischumschlag u.ä.

Daneben gehören dekadische Anzeigen zur Grundvariante fast aller Steuerungen. Dieser an sich bei NC redundante Aufwand erleichtert die Bedienung und den Service so, daß der nicht unerhebliche Mehrpreis in Kauf genommen wird [5.9].

Die Satznummernanzeige des aktuellen Bearbeitungssatzes ist 3stellig, die Werkzeuganzeige 2stellig.

Die Weganzeige kann für eine bis zwei Achsen vorgesehen werden, die Auswahl wird am Schalter vorgenommen:

Punkt-Strecken-Steuerung NC 470

– Festwert	F
– Korrekturwerte	*K1* bis *K3*
– absoluter Sollwert	S
– absoluter Istwert	I_{abs}
– Sollwert-Istwert-Differenz	$\Delta = F \pm K_1 \pm S - I$
– relativer Istwert	$I_{rel} = F \pm K_1 \pm K_2 \pm K_3 - I_{abs}$

Punkt-Strecken-Steuerung NC 430

– Sollwert-Istwert-Differenz	$\Delta = S - I$

Bahnsteuerung NC 450

– Istwert einer Achse	I

– Anschluß NC 410 je Achse möglich ohne zusätzliche Meßwertgeber.

Befehlsspeicheranzeige, bei M und G ist nur der letzte Befehl anzuzeigen, bei NC 450 nur der Zwischenspeicherinhalt.

Die Übernahme in den Anzeigespeicher (Bild 5.91) erfolgt bei aufgerufener Dezimale (s. Bild 5.50, S. 178) bei der Verrechnung $V \cdot \overline{K6}$ (10^0 während der Takte *57* bis *60*, bei 10^1 *121* bis *124* usw.). Das Vorzeichen wird getrennt gespeichert; ist es negativ, wird Komplementierung ausgelöst.

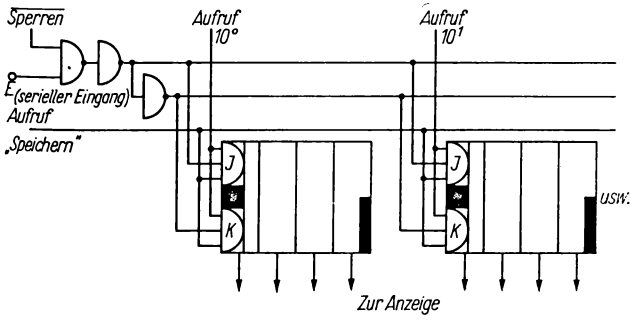


Bild 5.91
Anzeigespeicher

Im Schaltkreis 7441 ist parallel zum Schutz der Ausgangstransistoren eine Zenerdiode geschaltet (67 V $\leqq U_Z \leqq$ 107 V bei $I_a = 100 \cdots 200\ \mu A$).

Die heute eingesetzten Röhren für Ziffern bzw. Zeichen Z 560 M, Z 561 M (15 mm Höhe) verlangen 1,5 mA $\leqq I_a \leqq$ 2,5 mA bei $R_a \approx 75\ k\Omega$; Z 566 M, Z 567 M (30 mm Höhe) 3 mA $\leqq I_a \leqq$ 6 mA bei $R_a \approx 40\ k\Omega$.

Für Vorzeichen wurde diskreter Aufbau (Bild 5.92) bevorzugt.

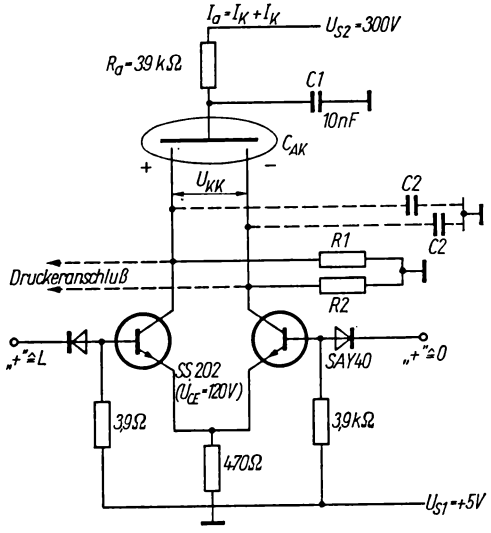


Bild 5.92. Vorzeichenanzeige

Die Kollektor-Emitter-Spannung kann auf 120 V durch eine Vorspannung auf die Katoden begrenzt werden, was sowohl über Kollektorwiderstände als auch Dioden, verbunden mit einer Zusatzspannung, erreichbar ist.

Positive Spannungsspitzen auf der Anode beim Umschalten der Katoden, die über C_{AK} auf die andere Katode übertragen würden, leitet *C1* ab. *C2* hält $U_{KK} \leqq 100$ V.

Die Lebensdauer der Ziffernröhren beträgt einige tausend Stunden, Verschleißerscheinung wird als Bedeckungsfehler sichtbar.

5.9.2. Befehlsausgabe

Zur Ansteuerung von Verbrauchern höherer Spannung bzw. Leistungsaufnahme als mit IC zulässig sowie zur galvanischen Trennung werden einstufige Schaltverstärker nach Bild 5.93 für 5 V, 50 mA und 30 V, 100 mA eingesetzt [5.16] [5.26] [5.40] [5.42]. Die Arbeitspunkte für Schaltbetrieb (Bild 5.94) liegen im Sperr- bzw. Übersteuerungsbereich. Im Sperrbereich fließt minimaler Kollektorstrom I_C, wenn $I_B < 0$ bei $U_{BE} \leqq -100$ mV.

Der Übersteuerungsbereich liefert geringen Spannungsabfall U_{CE} bei hohem I_C und P_V = konst. Der Einfluß von I_B, d.h. verschiedener Eingangspegel U_{BE} auf I_C, ist gering.

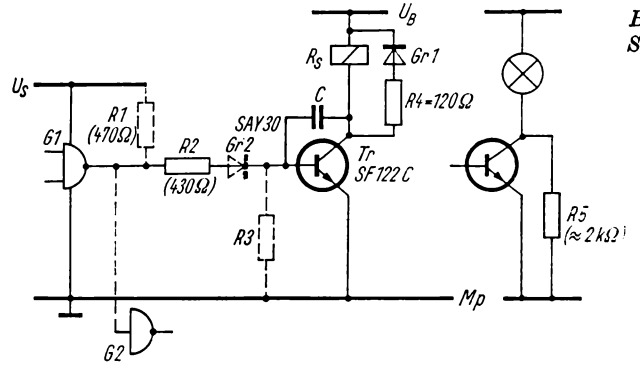


Bild 5.93
Schaltverstärker 30 V

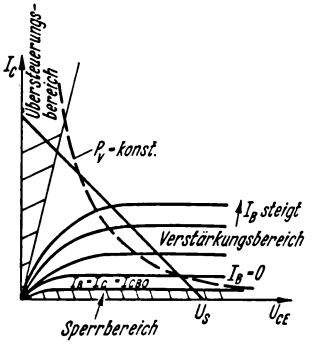


Bild 5.94. Kennlinie npn-Transistor

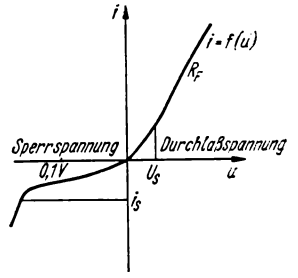


Bild 5.95. Diodenkennlinie

Die Lage der Arbeitsgeraden ist durch $U_S = U_{CE} + I_C R_C$ gegeben. (Dimensionierung s. einschlägige Literatur.)

Der kleine statische Störabstand zeigt sich in der Schaltschwelle $U_{BE} \approx 0{,}5$ V. Zu seiner Vergrößerung kann eine Diode *Gr2* (auch in die Emitterleitung) mit *R3* geschaltet werden (*R1* und *R2* sind niedriger zu wählen), deren Schleusenspannung (U_S) und deren Flußwiderstand (R_F) die Eingangsspannung erhöhen (Bild 5.95). Durch die *C*-Rückkopplung (Miller-Kondensator) wird die Schaltzeit erhöht und die Gefahr der Störungseinkopplung verringert.

Verzichtet man auf die Fan-out-Reserve für *G2*, kann *G1* über *R2* direkt den Transistor ansteuern, *R1* und *R3* entfallen [5.16].

Ersetzt man den Transistor SF 122 durch den Typ SF 121 ($U_{CE0} = 20$ V; $I_C = 100$ mA), erhält man einen Verstärker für 5 V. Dabei stellt $U_{CE\,sat} \leqq 1$ V einen nicht mehr zu vernachlässigenden Anteil am Spannungsgefälle dar.

Die Ausgabe erfolgt potentialfrei mittels gasgefüllter Relais RGK 20/1, 4 V ($U_B = 3{,}5 \cdots 7{,}5$ V; $R = 82\ \Omega$; $P_V = 304$ mW; $U_{\text{Schalt}} = 100$ V; $I_{\text{Schalt}} = 0{,}5$ A; $P_{\text{Schalt}} \leqq 15$ VA; Lebensdauer 10^6 bis 10^9 Schaltungen, lastabhängig; Schaltfrequenz < 500 Hz).

Direkte Ansteuerung eines gelöschten Relais durch zwei parallelgeschaltete Gatter ist nach [5.16] gestattet [5.16] [5.41]. Mit $R4 = 120\ \Omega$ (Bild 5.93) wird die Spannung über der Spule zum Abschaltzeitpunkt

$$U_{Sp} = -U_S \frac{R4}{R_S} = -5{,}25 \frac{120}{82} = 7{,}7\ \text{V}$$

und über dem Schalttransistor

$$U_{CE} = U_S \left(1 + \frac{R4}{R_S}\right) = 5{,}25 \left(1 + \frac{120}{82}\right) = 13\ \text{V},$$

wodurch Spule und Transistor geschützt sind und wegen *Gr1* kein Dauerstrom fließt. Durch die Beschaltung mit einem Widerstand klingt der Erregerstrom

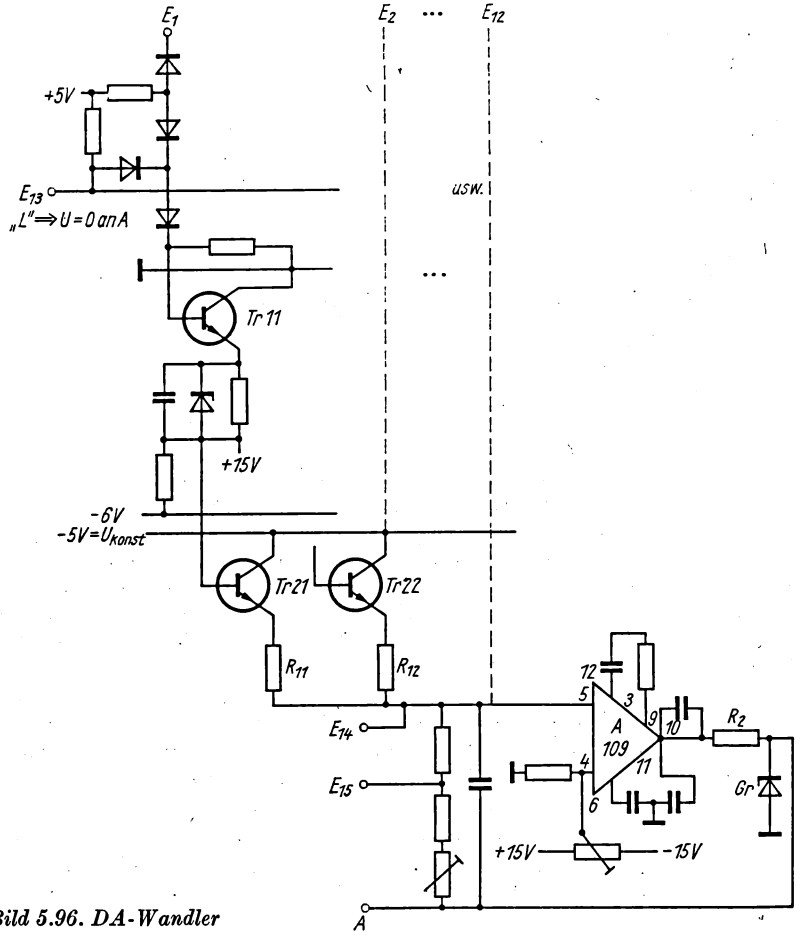


Bild 5.96. DA-Wandler

langsamer ab, $t_0 = 3\ T_S/(1 + R4/R_S)$ [5.42], wodurch das Relais verzögert abfällt. Die Anzugszeit wird nicht beeinflußt. Die gewählte Schutzkombination ist an Werkzeugmaschinen üblich, da sie relativ billig ist. Weitere Möglichkeiten s. *Habiger* [5.41] und [4.18].

Lampenansteuerung benötigt wegen der großen Einschaltströme ($10 \cdot I_N$) Vorheizung über eine gesonderte Spannung (etwa 3 V unter U_S oder durch einen zum Transistor parallelen Widerstand (*R5* im Bild 5.93) (Senkung auf $2 \cdot I_N$).

5.9.3. DA-Wandler

Der DA-Wandler bildet aus einem digitalen Sollwert eine Gleichspannung von 0 bis 10 V. Seine Arbeitsweise beruht auf einer Stromsummierung, d.h., jedem Stufensprung ist ein Stromzuwachs Δi zugeordnet. Dazu werden die Eingänge E_1 bis E_{12} nach Bild 5.96 mit den BCD-codierten Signalen beaufschlagt, wodurch bei $E_i = 0$ der Transistor Tr_{1i} gesperrt und der invers betriebene Tr_{2i} durchgesteuert wird. E_{13} = L bewirkt unabhängig von der Eingangsbelegung die Ausgangsspannung $U_A = 0$. Aus der Konstantspannungsquelle wird über den jeweiligen Widerstand R_{1i} ein bewerteter Strom zum Operationsverstärker geleitet. E_{14} gestattet das Einspeisen eines Zusatzstroms (eventuell Bereichserweiterung), und E_{15} dient der Verstärkungsänderung des Operationsverstärkers von außen durch Widerstandbeschaltung (Vorschubbeeinflussung).

Der dreidekadische DA-Wandler erhält einen Stufensprung von 10 mV (oder 5 mV).

Die Bewertung der Widerstände R_{1i} erfolgt mit (1, 2, 4, 8) 10^n. Am Summierwiderstand *R2* fällt die analoge Spannung ab. Er ist bei direkter Vorschubpro-

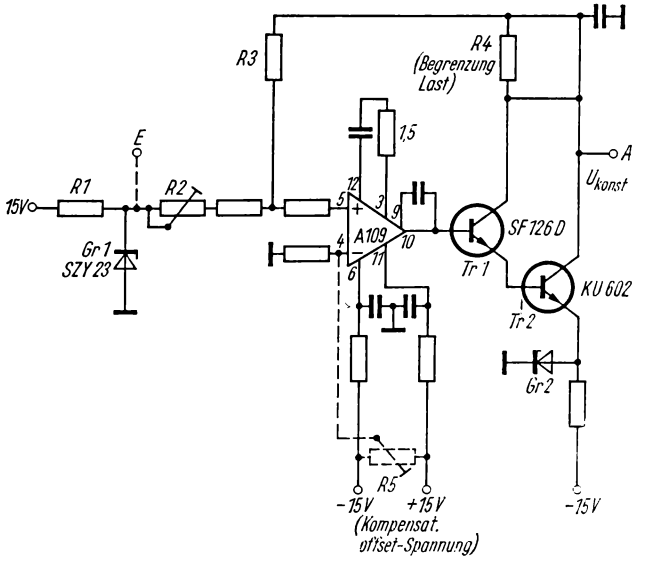


Bild 5.97. Konstantspannungserzeugung für DA-Wandler

grammierung an die Getriebekonzeption in Verbindung mit den Gegenkopplungs- und Anpaßwiderständen anzupassen.

Die Genauigkeit der Wandlung wird durch die Toleranz der Bauelemente sowie der Konstantspannung von — 5 V gegen *Mp* erzielt. Letztere wird separat in einer Stabilisierungsschaltung (Bild 5.97) erzeugt. Von *Gr1*, einer temperaturstabilisierten Zenerdiode, wird eine Spannung 8,4 $\pm$ 0,4 V als Vergleichsnormal (bzw. extern über *E* ohne *R1*, *Gr1*) vorgegeben, die einen konstanten Strom durch *R2* und *R3* zur Folge hat. Der über *R2* erzielte Spannungsabfall ergibt die Sollspannung. Die Darlingtonschaltung *Tr1*, *Tr2* verstärkt zum $I_{max} = 500$ mA, *Gr2* vermindert die Verlustleistung von *Tr2*.

Der Eingang *E* dient auch zur analogen Beeinflussung des Vorschubs von einer AC-Regelung.

Die Genauigkeit dieser Baugruppe liegt < 5 mV einschließlich Temperaturdrift.

DA-Wandler für Folgeregelkreise müssen kleine Totzeit, konstanten Nullpunkt und genügend große Auflösung haben.

6. FUNKTIONSEINHEITEN ZUR ANSTEUERUNG VON STELLGLIEDERN

6.1. Anpassung

6.1.1. Allgemeines

Aus den ursprünglich maschinengebundenen NC-Konfigurationen hat sich inzwischen der projektierungsfähige NC-Baukasten herausgebildet, der eine Vereinheitlichung der NC brachte. Die spezifischen Belange der Maschine sind somit durch Funktionseinheiten der Anpassung zu verwirklichen, in denen die bereitgestellten Koordinaten- bzw. Befehlsinformationen entschlüsselt, decodiert, neu codiert gespeichert, logisch verknüpft und verstärkt werden.

In der Anpassung für das System NC 400 werden folgende Aufgaben erfüllt:

- Inbetriebnahmebereitschaft der Maschine ohne Anschluß der NC mit Handbedienung als entscheidendes Kriterium für die Ökonomie der Inbetriebsetzung
- Umschaltung bei den Betriebsarten Automatik – Handbetrieb
- Speichern der M-Befehle
- digitale Vorschubausgabe an Kupplungsgetriebe
- analoge Sollwertvorgabe an Vorschubregelkreise
- digitale Drehzahlausgabe für Hauptantriebe
- analoge Sollwertvorgabe für Hauptantriebe
- Steuerung der Revolverkopfstellung bzw. des Werkzeugwechsels
- Zusammenfassung von Rückmeldungen zur Weitergabe an die NC
- Not- und Überwachungsschaltung.

Die Entscheidung über das physikalische Wirkungsprinzip innerhalb der Anpassung führte aus ökonomischen Erwägungen noch zur Verwendung von Relais, zumal die geforderte Schaltgeschwindigkeit und -frequenz recht niedrig liegen. Das Relais ist in Selbsthalteschaltung ein zuverlässiger und billiger Speicher mit Verstärkereigenschaft. In Zukunft sind kontaktarme bzw. -freie Anpassungen und Stellglieder zu erwarten, besonders eröffnen sich Kleinstrechnern mit gespeicherter Anpassungslogik Chancen für einen wirtschaftlichen Einsatz.

Auf Grund der IEC-Empfehlung 204-1 wird eine Steuerspannung von 48 V Gs verwendet ($+ 10\%$, $- 15\%$), Hilfsspannung 24 V Gs $\pm 20\%$.

Die Einsatzklasse beträgt $+5/+40/+15/80/1001$ nach TGL 9200/02.

Gestaltet sind die Anpassungsbaugruppen nach SAK-N 94 als steckbare Kartenbaugruppen 170 mm × 95 mm mit 31poliger Steckerleiste:

- Decodierung BCD in $\binom{10}{1}$, je 2 entkoppelte Eingänge
- 4×2 Wechsler, Silberkontakte Ag Pd 30, 2×1 Eingang, 2×2 Eingänge
- 4×2 Wechsler, Goldkontakte Au 10; für kleine Leistungen; 2×1 Eingang, 2×2 Eingänge

- 6 × 2 Schließer, Silberkontakte
- 5 × 2 Schließer, gepolte Relais
- 6 × 2fach Disjunktion
- Sollwert (Zenerdiode + Einstellregler) und 6 × 2fach Disjunktion
- Zuordnungsmatrix, maximal 14 Eingänge, maximal 9 Ausgänge, mit Entkopplungsdioden
- Spannungsteiler, R-C-Glieder.

Die Relais werden mit Diode und Widerstand gelöscht [5.42]. Zum Aufstecken einer Einheit zur Anzeige der Relaiszustände sind die Kartenbaugruppen mit einem 58poligen direkten Steckverbinder auf der Gegenseite ausgeführt.

6.1.2. Funktionseinheiten

6.1.2.1. *Grundeinheit*

Abhängig von der Betriebsart stellt die Grundeinheit (Bild 6.1) sog. Hauptpotentiale bereit, die alle benötigten Funktionsgruppen bzw. Teile in diesen aktivieren. Ohne NC-Anschluß ist das Potential „Handbetrieb" vom Bedientableau möglich.

Die Notschaltung ist durch aktive Reihenschaltung aller „Not-Aus"-Elemente einschl. „Grenzendlagenschalter" gewährleistet und stellt die Schutzgüteforderung sicher. Die Begrenzung der Bearbeitung einer Achse erfolgt von „Endlageschaltern"; nur im Notfall arbeiten die „Grenzendlagenschalter". Ein Zurückfahren von diesen ist nur von Hand möglich (s. TGL 200-0655/02, Abschn. 5.8.3.).

Bei Notsignal werden sämtliche Ausgaben an die Exekutive unterbrochen, die DA-Wandler werden genullt, elektromagnetische Spanneinrichtungen werden jedoch nicht abgeschaltet, und der Signalzustand der Anpassung bleibt erhalten.

Die Grundeinheit erfüllt die Überwachungsfunktionen für

- alle Spannungen
- den Luft- und Öldruck (zeitverzögert in der Einschaltphase)
- die Endlagenschalter für 2, 4 oder 6 Achsen und weitere projektierbare Überwachungsbedingungen.

Als Rückmeldungen zur NC wirken

- handbetätigter „Vorschub Stopp", „Externer Abgleich", „Spindel reversiert", „Endschalter erreicht" u.ä.
- handbetätigter „Start" (parallel zum NC-Starttaster) vom Bedientableau.

6.1.2.2. *M-Speicher*

Wie im Abschnitt 5. ausgeführt, können Hilfsbefehle von der NC direkt ohne dortige Speicherung zur Anpassung ausgegeben werden; es sind jedoch auch NC mit internen M-Speichern bekannt, die wieder mehr Ausgangsglieder bedingen.

Die BCD über 80 ms angebotenen 2 Dekaden werden mittels Kontaktpyramiden nach Bild 6.2 ($\binom{10}{1}$) entschlüsselt. Die Speicherung der M-Befehle erfolgt mit Relais in Selbsthalteschaltung ähnlich Bild 6.3.

Vor Abspeicherung wird wegen der Möglichkeit von Fehleingaben (Handeingabe) die Grundverriegelung (z.B. Rechtslauf – Linkslauf) gebildet.

Satzsuchlauf, „Not", M00, M01 verhindern den Aufruf.

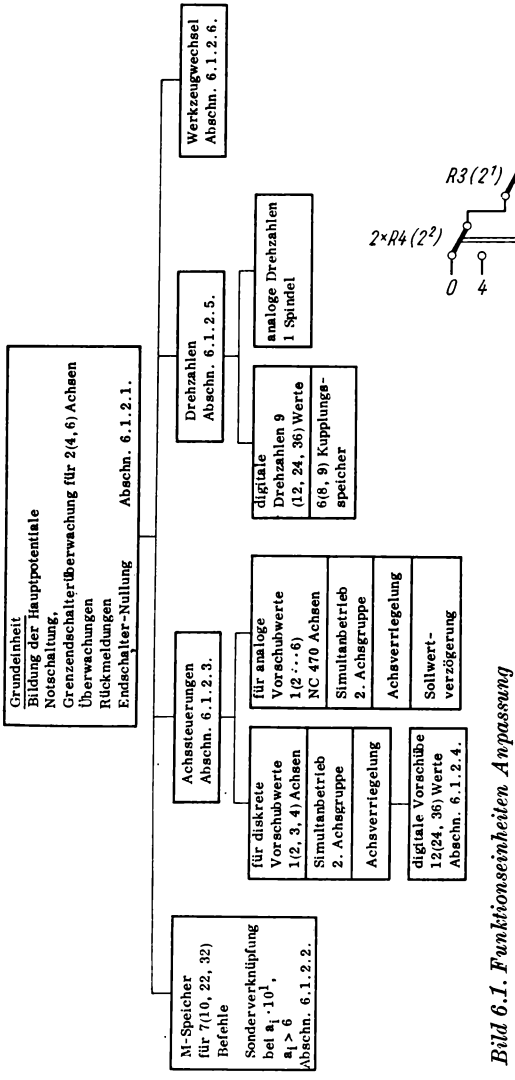


Bild 6.1. Funktionseinheiten Anpassung

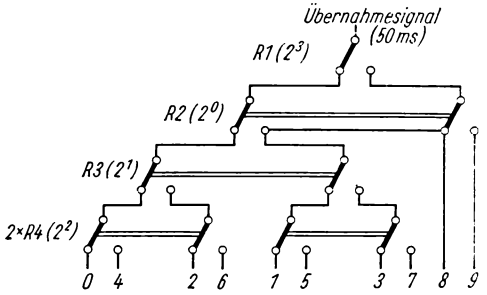
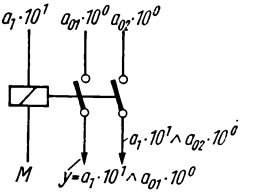


Bild 6.2. $\binom{10}{1}$*-Auswertung*

Bild 6.3. Konjunktion mit Relais



Die Funktionseinheit ist erweiterungsfähig gestaltet, indem die erste Baugruppe die in den meisten Steuerungen vorhandenen M-Befehle für Spindel, Kühlmittel, Werkzeugwechsel (M03 bis M09) und drei freie Speicher realisiert, zwei weitere ergänzen auf 22 bzw. 32 M-Befehle.

Kombinationen sind möglich als

- Speicherschaltung mit Löschung durch Unterbrechen der Halteleitung

- Ein-Aus-Schaltung, bei der ein zweiter M-Befehl den ersten löscht (z.B. M10, M11)
- 2fach Ein-Aus-Schaltung, bei der zwei einander ausschließende Speicher durch einen weiteren M-Befehl gelöscht werden (z.B. M03, M04, M05).

6.1.2.3. *Achssteuerungen*

Die Sollwertvorgabe unterscheidet sich je nachdem, ob Kupplungen (diskrete Vorschubwerte) anzusteuern oder stetige, analoge Werte bereitzustellen sind.

Der kupplungsgeschaltete Antrieb ist manuell durch die gegeneinander verriegelten Taster „Eilgang" (dominierend) oder „Vorschub" sowie „Aus" zu steuern. Mittels Wahlschalter lassen sich Achsgruppe, Bewegungsrichtung, Vorschubwert (s. Abschn. 6.1.2.4.) und Dauer- oder Tippbetrieb vorgeben. Die Achssteuerung speichert die Richtungen, verriegelt sie durch Diodenmatrix gegeneinander und mit den Endlagenschaltern.

Eine Rückmeldung der Achsbereitschaft gibt die Achsrichtung mit 48 V oder potentialfrei aus und löst die Klemmung.

Im Automatikbetrieb wird die Halteleitung der Vorschubrelais mit Aufruf der Zwischenvorschübe und durch „Halt" unterbrochen, außer bei Zwischenvorschub (ZV) $>$ programmierter Vorschub.

Sind die Achsen mit drehzahlgeregelten Antrieben ausgerüstet, ist das analoge Sollwertsignal zur Mischstelle durchzuschalten. Es wird als Spannungswert $\pm$ 0 bis 10 V an der Bedientafel mit Potentiometer bei Automatik vom DA-Wandler erzeugt. Der Achs- und Richtungsaufruf geschieht durch Wahlschalter oder in der NC, wenn Achsbereitschaft anliegt. Von Hand kann der Sollwert durch Tipptaster „Vorschub" bzw. „Eilgang" aufgeschaltet und durch „Aus" gelöscht werden. Die Sollspannung muß zeitverzögert zugeschaltet werden, um zeitliche Abläufe erst zu garantieren (z.B. Klemmung lösen).

Analoge Vorgänge passen sich den menschlichen Gepflogenheiten gut an, während digitale, sprunghafte Reaktionen den natürlichen Vorgängen weniger adäquat sind.

6.1.2.4. *Digitale Vorschübe*

Die Befehle werden wie im Bild 6.2 ($\binom{10}{1}$) decodiert, wobei diodenentkoppelte Wahlschaltereingabe bei Handbetrieb von der Maschinenbedientafel möglich ist.

Kernstück der Baugruppe ist die zu projektierende Kupplungscodierung. Nach Bild 6.3 werden Dezimalzahlen $a_1 \cdot 10^1 + a_0 \cdot 10^0$ dargestellt, indem a_1 auf die Relaisspule und a_0 auf den Relaiskontakt gelegt werden. Eine anschließende Diodenmatrix bildet die entsprechende Kupplungskombination. Da die NC die Zwischenvorschübe (ZV) wegabhängig errechnet (in der Anpassung ist erst zum F-Befehl der reale Wert projektiert), ist die Konjunktion ZV-Ausgabe = ZV-Aufruf $\wedge$ (Vorschub $>$ ZV) nötig.

6.1.2.5. *Drehzahlen*

Die Decodierung und Verknüpfung digitaler Werte erfolgt wie bei digitalen Vorschüben. Ein nachgeschalteter Speicher übernimmt die Kupplungsansteuersignale für (bis zu 9) nicht unter Last schaltbare Kupplungen, bzw. es erfolgt direkte Ausgabe an Lastschaltgetriebe, gegebenenfalls auch über Relaisverstärker.

Analoge Sollwerte bei geregeltem Hauptantrieb können aus dem DA-Wandler oder durch manuelle Potentiometereinstellung aus einer grob stabilisierten Spannung, beide 0 bis 10 V, gewonnen werden.

6.1.2.6. *Werkzeugwechsel*

Bei Werkzeugwechsel sind zwei Arten zu unterscheiden:

- Revolverkopfspeicher
- externer Werkzeugspeicher.

Während der Wechsel der Revolverkopfstellung voll mit der Anpassungsfunktionseinheit abgefahren werden kann, bedingt ein externer Speicher im NC400-Konzept eine getrennte Steuereinheit (VEB Werkstoffprüfmaschinen, Leipzig) für den Werkzeugwechsel. Hier gibt die Anpassung in Form einer Folgesteuerung nur Auslösebefehle vor.

Der die Revolverkopfstellung kennzeichnende T-Befehl wird $\binom{10}{1}$ decodiert und mit den Endschaltern des Revolverkopfes verknüpft. Mit fester oder programmierter Drehrichtung (keine selbständige Bestimmung des kürzesten Weges!) wird der Revolverkopf in die Sollage (oder ohne Zielangabe von Hand) bewegt. Danach löst eine Folgeschaltung „Klemmung" aus.

Die Baugruppe „Folgesteuerung" (Bild 6.4) läßt das gepolte Relais n

- erst bei Fertigmeldung $n-1$ wirksam werden
- den Schritt $n + 1$ vorbereiten und
- den Schritt $n - 1$ löschen.

Diese Rückmeldung $n - 1$ ist maschinenabhängig zu projektieren.

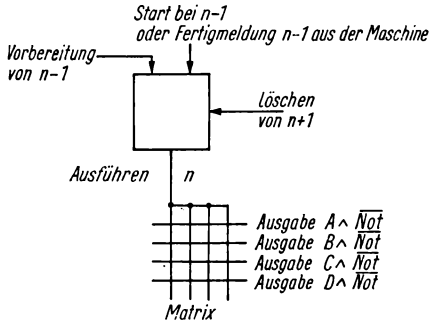


Bild 6.4. Folgesteuerung

Die Folgeschaltung ist eine Ringschaltung, d. h., Folgeschritt n_{max} wird von 1 gelöscht und „Externer Abgleich" rückgemeldet.

Als mechanische Folgesteuereinrichtungen haben sich Schrittschaltwerke (Bild 6.5) ebenfalls als ökonomische Lösungen gut bewährt. Die Information kann Kugeln, Plastnocken, Lochkarten u. ä. aufgeprägt werden.

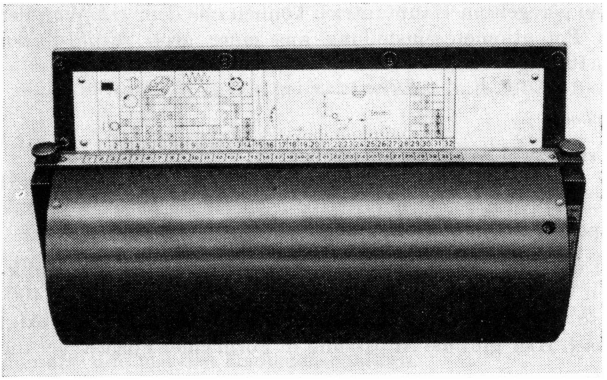


Bild 6.5. Schrittschaltwerk
Werkfoto VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt

6.1.3. Freiprogrammierbare Anpaßsteuerung

Mit dem Vordringen der Rechentechnik in allen Wirtschaftsbereichen wird auch ihr Einsatz zur Anpaßsteuerung und zur Steuerung für herkömmliche Werkzeugmaschinen (z. B. Transferstraßen) interessant. Das Ziel ist, durch Wegfall von fester, der spezifischen Maschinenfunktion angepaßter Verdrahtung und Verlegen der variablen logischen Funktion (Anweisung) in Speicher flexibel zu werden und somit eine Serienproduktion zu erreichen.

Im englischen Sprachgebrauch als „programmable machine control" (PMC) [6.1], im deutschen als „programmierbare Logikeinheit" (PLE) bekannt, handelt es sich um Funktionssteuerungen, bei denen n Eingänge zu m Ausgängen durch Boolesche Verknüpfungen und Speicher- sowie Zeitfunktionen kombiniert sind. Sie bieten folgende Vorteile:

- unabhängige Fertigung vom Einsatzfall, wozu nur die Anzahl der Ein- und Ausgänge sowie Speicherplätze grob abzuschätzen ist
- schnelle Projektierung für den Anwendungsfall
- leichte Änderung bzw. Erweiterung
- Speicherschutz bei Netzausfall
- Testung mit Testprogrammen.

Ausführungsarten sind in [6.2] bis [6.5] vorgestellt. Von *Wiechert* [6.5] sind besonders die kombinatorischen und sequentiellen Bedingungen mathematisch gefaßt und die Eingangsvariablen durch Kombinations- bzw. Sequenzoperatoren zum Ausgangszustand geführt.

Während in [6.5] mehrere zu Binärwerten zusammengefaßte Eingangsvariable mit sog. Markierungsworten zum Steuerausgang verknüpft werden – gewählt wurde die Alternative/Antivalenz-Normalform als Grundverknüpfung, realisieren die Ausführungen [6.2] und [6.4] nur eine logische Grundoperation in einem Schritt. Der prinzipielle Aufbau der Funktionaleinheiten ist im Bild 6.6 gezeigt.

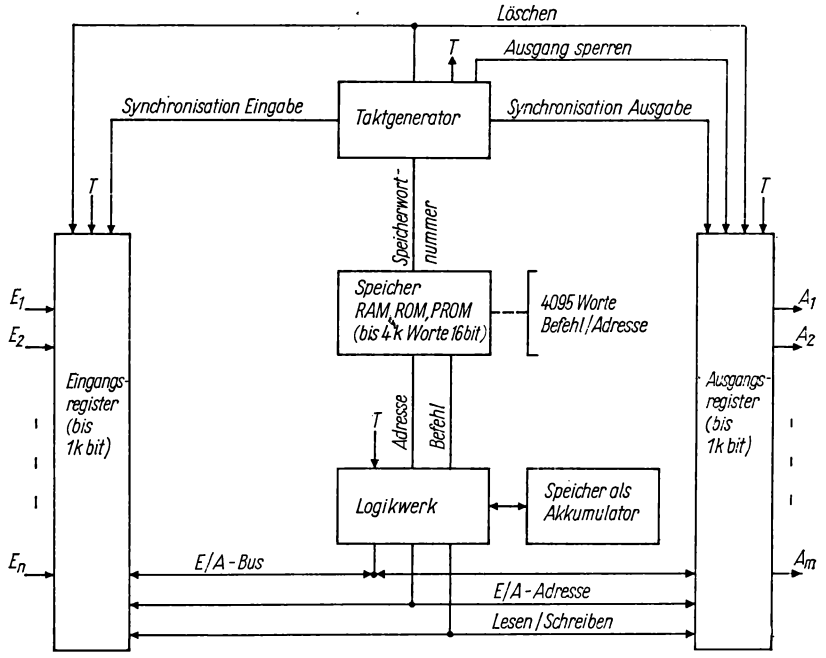


Bild 6.6. Blockschaltbild einer programmierbaren Steuerung

Im Eingangsregister werden alle externen Signale von Tastern, Endschaltern, Relais usw. durch den Taktgeber gesteuert und gleichzeitig abgefragt, nach eventuell nötiger Pegelwandlung eingespeichert. Jeder Eingang wird numeriert, wobei das Oktalsystem gerätetechnische Vorteile bietet. Das Ausgangsregister ist ebenfalls adressierbar und erhält seine Informationen bzw. gibt den Signalzustand zurück über einen Eingabe-Ausgabe-Datenbus an eine Informationssammelleitung.

Im Speicherblock mit bis 4 *k* Wörtern Kapazität stehen die Anweisungen zu den Operationen wortweise in den adressierbaren, als Matrix aufgebauten Speicherzellen [6.6]. Das geschieht durch Schreib-Lese-Speicher (RAM, englisch random access memory), wodurch das Programm jederzeit überschrieben, aber auch zerstört werden kann und elektrisch bei Netzabschaltung gehalten werden muß.

Es genügt, die funktionell erprobte Funktion in Nur-Lesespeicher (ROM, englisch read only memory) zu fixieren, die beim Hersteller über Masken programmiert werden und „unzerstörbare" Informationsträger darstellen. Für die Testphase an den Mustermaschinen und bei geringer Stückzahl eines Maschinentyps bzw. bei zu erwartenden Änderungen von Teilfunktionen innerhalb der Laufzeit eines Typs bieten sich erst beim Anwender programmierbare Speicher (pROM) an. Das geschieht durch Abschmelzen der Diodenverbindung in den

Knotenpunkten der Matrix durch einen Stromstoß und ist irreversibel. Einige Ausführungen lassen sich durch Bestrahlung mit UV-Licht programmieren und auch löschen [6.7].

Man kann auch die Verbindungen in der Matrix durch Diode-Widerstand herstellen, wobei der Widerstand aus glasartigem Material im amorphen Zustand durch Erhitzen hochohmig wird. Der niederohmige, kristalline Zustand läßt sich durch einen Spannungsimpuls zurückgewinnen [6.8].

Neben diesen eleganten integrierten Speichern lassen sich aufwendigere diskrete Widerstands- (parasitäre Ströme erschweren die Auswertung), Dioden- bzw. Transistornetzwerke einsetzen.

Auf magnetischer Basis arbeiten Stab- und Ringkernspeicher. Bei letzteren werden die Programme durch Auffädeln der Ringkerne – Zeilenleitung (Wortleitung) durch den Kern bedeutet L – gewonnen. Eine nachträgliche Änderung ist möglich, solange die Fädelspeicher nicht zum Schutz vergossen werden.

Die z. Z. verbreitetste PMC ist die Steuereinheit PDP 14.

Im Wort des Speichers werden die Ein- und Ausgänge adressiert und der Verknüpfungsbefehl vorgegeben. Jeder Speicherplatz wird vom Taktgeber (oktal) aufgerufen. Das Logikwerk führt exekutiv die im Speicher stehende Anweisung aus. Zur Kombination mehrerer Wörter kann ein Zwischenergebnis im RAM-Speicher eingeschrieben und als Ausgangsgröße des folgenden Befehls verwendet werden. Mit dem Taktsteuerwerk wird die zyklische Abfrage aller Wörter des Speichers gesteuert und die Synchronisation der Übernahme und Ausgabe erzielt.

Ergänzungen sind Zeitbaustein, Zählerbaustein, Index-Zusatz, Haftspeichereinheit zur Weiterarbeit nach Spannungsausfall. Die Befehlsliste erhält z. B. folgende 8 Befehle, andere Lösungen arbeiten mit 16 Befehlen:

AND	$\langle AC\rangle := \langle AC\rangle \wedge \langle E/A\text{-}Bus\rangle$
ANDC	$\langle AC\rangle := \langle AC\rangle \wedge \overline{\langle E/A\text{-}Bus\rangle}$
OR	$\langle AC\rangle := \langle AC\rangle \vee \langle E/A\text{-}Bus\rangle$
ORC	$\langle AC\rangle := \langle AC\rangle \vee \overline{\langle E/A\text{-}Bus\rangle}$
LDA:	Laden des AC vom E/A-Bus
LDAC:	Laden des AC vom negierten E/A-Bus
STO:	Datentransport und Speichern
AUX:	Hilfsfunktionen (z. B. Überspringen, Hauptrelaisfunktion „Alles Aus“ usw.).

Die bekannte Selbsthalteschaltung (Bild 6.7 mit einer Verriegelung *A2*) wird in folgende Schritte zerlegt zwecks Prüfung, ob *A1* L-Signal erhalten soll:

- prüfe den Zustand *E2* und speichere: LDA *E2*
- prüfe den Zustand *A1* und verknüpfe disjunktiv: OR *A1*
- speichere ab: STO *X*
- prüfe den Zustand *E1* und speichere: LDA *E1*
- prüfe den Zustand *A2*, negiere und verknüpfe konjunktiv und speichere: ANDC *A2*
- verknüpfe konjunktiv mit *x*: AND *X*
- speichere ab: STO *X* ≡ Ergebnis *A1*.

Aus Zeitgliedern, die die Zustände vor, während und nach dem Zeitablauf vorgegeben erhalten, lassen sich Ein-Impuls-Ausgaben verwirklichen.

Bei programmierbaren Steuerungen liegt demnach eine relativ einfache Folgesteuerung vor, die aus den Teilen

Eingabe – Verknüpfung – Ausgabe

besteht, wobei sich die Zahl der Eingabe- zu der der Ausgabeinformation etwa wie 2:1 verhält.

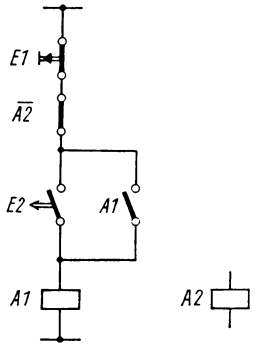


Bild 6.7. Selbsthalteschaltung (zum Beispiel)

Große Aufmerksamkeit wird wegen des gewünschten Austauschs von Erzeugnissen der Festlegung der Nahtstelle zwischen NC und Anpassung gewidmet. Dabei werden Signalform und -inhalt, Zeitablauf und Pegel, Löschschaltungen induktiver Glieder sowie Parameter der Stromversorgung angegeben. (Siehe VDI 34 22; im RGW sind die Übergabesignale als Leitmaterial abgestimmt.)

6.2. Antriebe

6.2.1. Grundlagen

Die Einteilung der Antriebe erfolgt bezüglich des Einsatzgebietes in

- Hauptantriebe, die die Formänderungsenergie der Hauptbewegung an das Werkzeug (Spindel) oder Werkstück (Drehfutter, Karussell) liefern
- Nebenantriebe, die die kinetische Energie zur Lageänderung (Vorschub) von Werkzeug oder Werkstück bereitstellen. Diese sind vorwiegend im An- bzw. Auslauf stark belastet, d.h. Beschleunigungsantriebe.
- Hilfsantriebe, die Operationen im technologischen Prozeß (Schmier-, Kühlmittel) oder zur Automatisierung (Werkzeugwechsel) ermöglichen.

Der Drehstrom-Asynchronmotor ist robust und billig, jedoch erreicht man nur mit Kupplungs- bzw. Lastschaltgetrieben eine gestufte Antriebsdrehzahl. Er ist für Hauptantriebe und an herkömmlichen Werkzeugmaschinen für Nebenantriebe weit verbreitet.

Für stufenlose, geregelte Vorschubantriebe waren wegen der Leistungsdichte, der geringen Baugröße und der guten dynamischen Eigenschaften lange Zeit

elektrohydraulische Antriebe vorherrschend. Erst seit der Entwicklung von Gleichstromstellmotoren hoher dynamischer Güte und der Leistungselektronik werden diese zunehmend vom elektrischen Antrieb abgelöst.

Die Vorteile eines geregelten Gs-Antriebs sind

- Ansteuerung auf geringem Leistungsniveau
- verlustarme, stetige Stellung unter Last
- symmetrische Stellung in beiden Drehrichtungen (Reversieren, Vier-Quadranten-Antrieb)
- leichte Stellbarkeit
- geringe Anregel-, Hochlauf- und Bremszeit
- Wirkungsgrad 50 bis 75% bei Leonardsatz, Amplidyne, Thyristorregelung. Die Verlustwärme entsteht größtenteils außerhalb der Maschine.
- große Schalthäufigkeit
- leichter Energietransport.

Nachteilig ist der noch recht hohe Preis.

Die Arbeitsweise des Antriebs wird nach den Quadranten der Drehzahl-Drehmomenten-Fläche gemäß Bild 6.8 in Ein-, Zwei- und Vier-Quadranten-Antrieb unterteilt:

I Ein-Quadranten-Antrieb: Hochlauf in einer Richtung 0, *1*, *2*, *3*, *4*) zum Arbeitspunkt A_1 bei freiem Auslauf (*4*, *5*, 0), ergibt lange Bremszeiten

II Zwei-Quadranten-Antrieb: Zum Bremsen (*4*, *5*, *6*, *7*, 0) wird der Motor als Generator bis zum Stillstand ($M_{Br} + M_W$) betrieben; wird dazu umgeschaltet, liegt unstetiger, bei Umsteuerung stetiger Betrieb vor.

III, IV Vier-Quadranten-Antrieb: Nach dem Umsteuern und Stillstand wird in Gegenrichtung beschleunigt (*7*, *8*, *9*) und vom Arbeitspunkt A_2 durch gegensinniges Ansteuern (*10*, *11*, *2*, 0) wieder abgebremst.

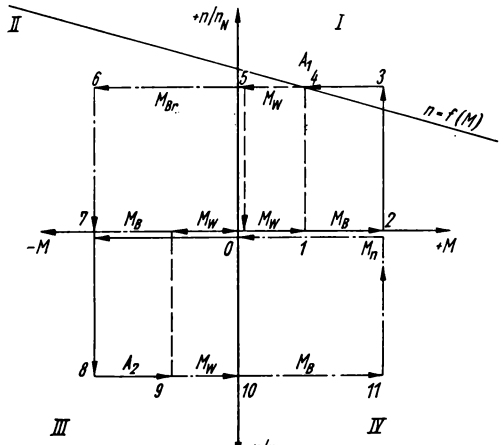


Bild 6.8. Drehzahl-Drehmomenten-Diagramm
(Φ = konstant) idealisiert [6.6]
M_B Beschleunigungsmoment
M_{Br} Bremsmoment
M_W Widerstandsmoment

Das Grundgesetz der Dynamik für Drehbewegungen lautet:

$$M = J \cdot \varepsilon$$

$$1\,\mathrm{Nm} = 1\,\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}^2 \cdot 1\,\frac{1}{\mathrm{s}^2}\,(= 1\,\mathrm{Ws}) \tag{6.1}$$

Zur Umrechnung veralteter Einheiten in SI-Einheiten gilt

$$F = m \cdot b$$

$$1\,\mathrm{N} = 1\,\mathrm{kg} \cdot 1\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2} = \frac{1}{9{,}81}\,\mathrm{kp} \tag{6.2}$$

Schwungmoment $GD_i^2 = 4g \cdot J$ (6.3)

Drehwucht $E = \frac{J}{2}\,\omega^2$ (6.4)

Leistung $P = M\,\omega$

$$1\,\mathrm{W} = 1\,\frac{\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}^2}{\mathrm{s}^2} \cdot \frac{1}{\mathrm{s}} = 1\,\frac{\mathrm{Nm}}{\mathrm{s}}. \tag{6.5}$$

Veraltet ist

$$P_{/\mathrm{kW}} = \frac{M_{/\mathrm{kpm}} \cdot n_{/\mathrm{min}^{-1}}}{973}.$$

Winkelgeschwindigkeit: $\omega = \frac{\mathrm{d}\alpha}{\mathrm{d}t} = 2\pi n$ (6.6)

$$\approx \frac{n}{10}\ \text{in}\ \frac{1}{\mathrm{s}}\ \text{bei}\ n\ \text{in}\ \frac{1}{\mathrm{min}}.$$

Winkelbeschleunigung: $\varepsilon = \frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}^2\alpha}{\mathrm{d}t^2}\ \text{in}\ \frac{\mathrm{rad}}{\mathrm{s}^2}$ (6.7)

Aus Gl. (6.1)

Grenzbeschleunigung: $\varepsilon_{\max} = \frac{M_{\max}}{J}$. (6.8)

Aus dem Energiesatz folgt die Umrechnung translatorischer in rotatorische Bewegung:

$$\frac{m}{2}\,v^2 = \frac{J}{2}\,\omega^2 \tag{6.9}$$

v Geschwindigkeit des Schwerpunkts

$$J = \frac{m\,v^2}{\omega^2} \tag{6.10}$$

m auf die Motorwelle bezogene Masse.

Mit Gl. (6.10) reduziert sich eine translatorisch bewegte Masse von z. B. 1000 kg bei einem „Übersetzungsverhältnis“

$$\frac{v}{n} = \frac{0{,}02\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}}{1500\,\mathrm{min^{-1}}}$$ der Kugelumlaufspindel mit Getriebe auf

$$J = 0{,}162 \cdot 10^{-4}\,\mathrm{kg \cdot m^2}.$$

Gl. (6.9) differenziert $mv\dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = J\,\omega\dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}$ ergibt

$$m\,b\,v = J\,\varepsilon\,\omega \tag{6.11}$$

$$F\,v = M\,\omega \rightarrow M = \frac{F\,v}{\omega} \tag{6.12}$$

für das auf die Motorwelle reduzierte Moment.

Als Zahlenwertgleichung

$$M_{/\mathrm{Nm}} = 9{,}55\,\frac{F_{/\mathrm{N}} \cdot v_{/\mathrm{m \cdot s^{-1}}}}{n_{/\mathrm{min^{-1}}}}. \tag{6.13}$$

Gleichzeitig gilt mit

$$v_T = \frac{h\,\omega}{2\,\pi\,i} \tag{6.14}$$

als optimale Getriebeübersetzung [6.9]

$$i = \sqrt{\frac{I_{\mathrm{Vorschubspindel}}}{0{,}7 \cdot I_{\mathrm{Mot}}}}. \tag{6.15}$$

Definitionen

Das Dauerdrehmoment M_D (z. T. auch als Nennmoment M_N bezeichnet) ist das Moment, bei dem Dauerbetrieb bei Nenndrehzahl n_N möglich ist. Je nach Schaltung ist die dem Motor zugeführte Spannung oberwellenbehaftet. Für Gleichstrommotoren gilt M_D für Speisung mit reinem Gleichstrom.

Die Nenndrehzahl n_N ist die Drehzahl, bei der ein Motor im Dauerbetrieb mit dem Dauerdrehmoment belastet werden darf.

Die Drehmomentenüberlastbarkeit ist das Verhältnis des kurzzeitig im Beschleunigungsvorgang abgegebenen maximalen Moments M_{max} zum Dauerdrehmoment

$$Z = \frac{M_{\mathrm{max}}}{M_D}. \tag{6.16}$$

$$\text{Stromüberlastbarkeit } K_I = \frac{I_{\mathrm{max}}}{I_D} \geqq Z. \tag{6.17}$$

Die maximale Drehzahl n_{max} ist die höchstzulässige Drehzahl.

Die minimale Drehzahl n_{min} ist die kleinste Drehzahl bei statischer Belastung [$M = f(\varphi, t) = \text{konst.}$] im Bereich $0{,}15\,M_D \leqq M \leqq M_D$, bei der ein Ungleichförmigkeitsgrad im ungeregelten Betrieb

$$k_q = 2\,\frac{n_2 - n_1}{n_2 - n_1},\quad n_1 \leqq n_{\mathrm{min}} \leqq n_2, \tag{6.18}$$

bei Dauerbetrieb $\delta = 0{,}1 \cdots 0{,}2$ [6.9]; bei Aussetzbetrieb $\delta = 0{,}2 \cdots 0{,}3$ gilt. Die minimale Drehzahl $n_{\min}$ ist auch die Drehzahl, bei der

$$\frac{\Delta n}{n_{\min}} = \frac{n_0 - n_{MD}}{n_{\min}} \leqq 0{,}25. \tag{6.19}$$

Bei

$$\Delta n = \text{konst. ist } \frac{\Delta n}{n_{\min}} = S \frac{\Delta n}{n_{\max}}, \tag{6.20}$$

woraus die „hohe" Fehlergrenze von 25% [Gl. (6.19)] folgt.

Bei sehr kleiner Drehzahl sind die als „Stick-slip"-Effekt bekannten, nichtlinearen Reibungsverhältnisse (Gleitreibung $\leftrightarrow$ Haftreibung) unvermeidbar.

Der Drehzahlstellbereich ist das Verhältnis

$$S = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \varphi^{z-1}; \tag{6.21}$$

φ Stufensprung (s. Abschn. 2.6.8.), z Stufenzahl.

Gl. (6.21) abgeleitet gibt

$$z = \frac{\lg S}{\lg \varphi} + 1, \tag{6.22}$$

bei $\varphi = 1{,}12$ wird

$$z = \frac{\lg S}{0{,}05} + 1. \tag{6.23}$$

Definitionen der Zeitabläufe

Nach TGL 14591 ist die Anregelzeit t_{an} diejenige Zeitspanne, die beginnt, wenn die Regelgröße nach einem Stör- oder Führungsgrößensprung ein vereinbartes Toleranzband um die Führungsgröße verläßt, und die endet, wenn sie in dieses Toleranzband erstmalig wieder eintritt. (Das Toleranzband darf nochmals durch Überschwingen verlassen werden.)

Die Ausregelzeit t_{aus} ist t_{an} + die Zeit bis zum dauernden Verbleib im Toleranzband.

Die Hochlaufzeit t_H ist diejenige Zeitspanne, die im linearen Regelbereich nach einem der Nenndrehzahl entsprechenden Sollwertsprung bis zum aperiodischen Erreichen von 0,9 n_N bei dynamischer Anpassung [s. Gl. (6.27)] vergeht.

$$t_H = \frac{\omega_0}{\varepsilon_0} \approx 3\,\tau \text{ [6.9]}; \tag{6.24}$$

τ Motorzeitkonstante, ω_0, ε_0 Leerlaufwerte.

Für Gleichstrom-Nebenschlußmotoren gilt weiter:

$$\text{Anzugsmoment } M_A \approx 9{,}55 \frac{U^2_{N/\mathrm{V}^2}}{R_{A/\Omega} \cdot n_{0/\mathrm{min}^{-1}}} \text{ in Nm.} \tag{6.25}$$

Stromwärmeverluste:

$$V_L \approx (0{,}6 \cdots 0{,}7) \frac{1 - \eta_N}{\eta_N} \cdot P_N \text{ in W.} \tag{6.26}$$

In [6.10] wird die kritische Anpassung mit

$$J_{\text{Mot}} \begin{matrix} > \\ = \\ < \end{matrix} J_{\text{Last}} \quad \begin{matrix} \text{überdimensioniert} \\ \text{angepaßt} \\ \text{unterdimensioniert} \end{matrix} \tag{6.27}$$

und

$$\varepsilon_{\text{res}} = \frac{\varepsilon_{\text{Mot}\,0}}{2} \tag{6.28}$$

begründet, bei der die Leistungsänderung im Hochlaufvorgang bei $M_A = \text{konst.}$ ein Maximum hat.
Bei Drehmaschinen schwankt die Fehlanpassung nach [6.11]

$$J_{\text{Masch}} : J_{\text{Mot}} = 0{,}5 \cdots 20.$$

Für die Vorschübe und Drehzahlen gelten TGL 200–0863/06 (s. Abschn. 2.6.8.), TGL 16627 und TGL 12118 (s. Abschn. 5.8.4.4.).

6.2.2. Hauptantriebe

Da die Hauptantriebe nicht NC-spezifisch sind, wird bezüglich Einzelheiten auf die Spezialliteratur verwiesen. Von der NC werden nur Drehrichtung und digitaler (codierter) bzw. analoger Sollwert ausgegeben, die in der Anpassung zur Polumschaltung und Kupplungsansteuerung umgewandelt bzw. ausgegeben werden. Durch unterschiedlichste technologische Bedingungen bis zur Feinbearbeitung werden Hauptantriebe stark schwankend belastet, wodurch sich für adaptive Regelung ein günstiges Angriffsfeld eröffnet.

Geregelte Hauptantriebe verwenden noch vorwiegend Gleichstrom-Nebenschlußmotoren mit ihrer harten Drehzahl-Drehmomenten-Kennlinie, die von Leonardumformern, Amplidyne oder mit steigender Tendenz [5.12] von Thyristorstellgliedern angesteuert werden.

Drehzahlregelung von Ds-Motoren durch Frequenzstellung in Stromrichterkaskaden hat für NCM noch keine Bedeutung erlangt.

Die Lastkennlinien $M = f(n)$ bzw. $P = g(n)$ für Werkzeugmaschinen zeigt Bild 6.9. Für Gleichstrommotoren gilt

$$E = c_1 \Phi n = U - I_A R_A$$

$$n = \frac{U - I_A R_A}{c_1 \Phi} \tag{6.29}$$

$$P = c_2 M n. \tag{6.30}$$

Ankersteuerung: $n \sim U - K_1$; $M \sim \Phi I_A = \text{konst.}$ (6.31)

$$P \sim U \sim n$$

Feldschwächung: $n \sim \frac{1}{\Phi}$ $\left(\text{bis } \frac{1}{3} \Phi_{\text{Nenn}}\right)$

$$M \sim \Phi \sim \frac{1}{n}\,; \quad P = U I_A \sim M n = \text{konst.} \tag{6.32}$$

Da die Motorgröße vom Drehmoment abhängt, ist es praktisch belanglos, ob die Drehzahlstellung nur im Anker oder auch im Feld erfolgt. Der nur ankergestellte Motor muß eine höhere Nenndrehzahl und wegen $P \sim M n$ höhere Leistung

aufweisen, wodurch sich der Aufwand an Stellgliedern im Ankersteuerkreis erhöht. Andererseits benötigt man einen zweiten (Feld-)Regelkreis.

Als Ein-Richtungs-Stromrichter ohne Momentumkehr sind halbgesteuerte Brükken schaltungen einsetzbar. Die Freilaufdiode gestattet Stillstand ($U_{\mathrm{Mot}} = 0$). Zur Führung des Antriebs muß jedoch stets $n_{\mathrm{Ist}} \leqq n_{\mathrm{Soll}}$ sein; Bremsung ist nur über Widerstände möglich. Durch Umschaltung des Ankerkreises mit Richtungsschütz erreicht man bei einer stromlosen Pause von mindestens 100 ms [6.10] [6.12] Nutzbremsung. Umschaltung des Feldes ist nur erlaubt ($\tau_{\mathrm{el.}}$ groß), wenn kein Ankerstrom möglich wird.

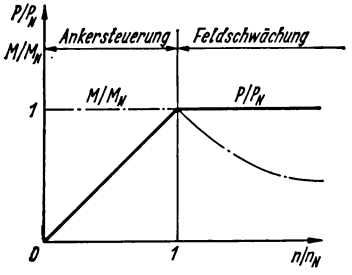


Bild 6.9. Drehmoment-(Leistungs-)Drehzahl-Kennlinie

Ein Vier-Quadranten-Antrieb ist mit Leonardsatz, Amplidyne und Umkehrstromrichter möglich, die beim Bremsen als Wechselrichter arbeiten. Bei kreisstrombehafteten Schaltungen werden die nicht belasteten Ventile so nachgeführt ($180° - \alpha$), daß sie bei Momentumkehr sofort kontinuierlich Strom übernehmen können. Der Kreisstrom belastet die Ventile zusätzlich und wird durch Drosseln auf etwa 0,1 I_N begrenzt. Der Kreisstrom verhindert bei $I_A = 0$ das Lücken des Stroms.

Dagegen ergeben kreisstromfreie Schaltungen bei Umkehr eine stromlose Pause von einigen ms (nach [6.13] bei Antiparallelschaltung etwa 7 ms), wobei die Regelung erst ab $t_{\mathrm{tot}} = 20$ ms merklich beeinflußt wird [6.14].

Schaltungen mit elektronischem Wendeschütz für höhere Leistungen entsprechen den Bedingungen der kreisstromfreien Schaltung [6.14].

Für Werkzeugmaschinen wird nach [6.12] eine kreisstromfreie Zweistromrichterschaltung mit Impulsumschaltung ($t_{\mathrm{tot}} \approx 50$ ms [6.15]) mit unterlagertem Stromregler empfohlen.

Für Hauptantriebe steht das Thyresch-System des VEB Kombinat Elektroprojekt und Anlagenbau Berlin (Bild 6.10) zur Verfügung [6.13].

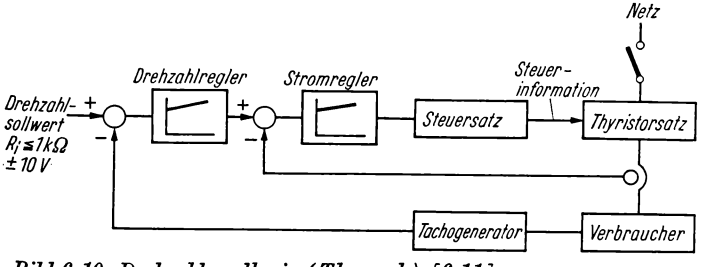


Bild 6.10. Drehzahlregelkreis (Thyresch) [6.11]

Die Antriebsleistungen an Werkzeugmaschinen liegen normalerweise zwischen 2 und 100 kW, wobei Stellbereiche von 11 bis 280 [1.9] üblich sind. Zukünftig ist wegen erhöhter Schnittgeschwindigkeit, um mit einfacher Getriebestufe auszukommen, ein Feldstellbereich bei gleicher Motorgröße von 1:(5 bis 10) statt bisher 1:2,5 notwendig.

Zur Vertiefung des Stoffs wird als Zusatzliteratur [6.11] bis [6.18] empfohlen.

6.2.3. Vorschubantriebe

6.2.3.1. *Gleichstrom-Vorschubantrieb*

Die Gleiteigenschaften der Maschinenführungen wurden so weit verbessert, daß die Vorschubleistung nur noch wenige Prozent der Hauptantriebsleistung beträgt. Das Moment sinkt bei Wälzführung und Kugelumlaufspindel auf $< 20\%$ gegenüber Gleitführung [1.9].

Mit

$$\eta_{\text{Kugelschraubtriebe}} = 0{,}9 \cdots 0{,}95,$$
$$\eta_{\text{Wälzführungen}} = 0{,}87 \cdots 0{,}91$$

steigen die Wirkungsgrade bisheriger konventioneller Werkzeugmaschinen von 0,11 bis 0,17 auf 0,78 bis 0,86.

Für Gleichstrom-Vorschubantriebe kommen permanenterregte, in Ausnahmefällen auch fremderregte Motoren in Frage, deren Auswahl in [6.11] erläutert wird.

Wird die Geschwindigkeit nur gesteuert, werden Störgrößen voll wirksam. Die Geschwindigkeitsstellung erfolgt dabei durch Untersetzungsgetriebe, die unter Last schaltbar sein müssen. Verwendet man Getriebe auch in Regelstrecken, ist auf kleines Trägheitsmoment zu achten, und der Anbau muß spielfrei, lose- und torsionsarm erfolgen.

Es gilt nach [1.9] für „normale Genauigkeit" bei Werkzeugmaschinen die Umkehrspanne

$$\sigma = \frac{\alpha_{\text{Mot}}\, i\, h}{360^\circ} \leqq 3\ \mu m \tag{6.33}$$

mit α_{Mot} Getriebelose an der Motorwelle; i Übersetzungsverhältnis; h Spindelsteigung.

Eigenfrequenz (Kennfrequenz) des mechanischen Teils einer Maschine:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k_{\text{ges}}}{m}} \leqq 45\ \text{Hz} \quad [1.9] \tag{6.34}$$

mit

$$k_{\text{ges}} = \frac{\Delta F}{\Delta x} \quad \text{in} \quad \frac{\text{N}}{\text{m}} \text{ Gesamtsteife}$$

bzw.

$$\frac{1}{k_{\text{ges}}} = \sum_{i=1}^{4} \frac{1}{k_i};$$

k_i Steife der Spindellängslagerung, der Längsverformung, der Spindelmutterlängsverformung und der Torsion.

Ein hochwertiger Vorschubantrieb gestattet, den gesamten Stellbereich bis zum Eilgang stetig durchzusteuern ($S = 1000$ bis 10000 und mehr). Die kosten-

günstigen Maschinenumformer bzw. -verstärker erreichten solche Stellbereiche noch nicht. Daher mußten Lastschaltgetriebe zwischengeschaltet oder getrennte Eil-(Schleich-)gangmotoren [6.19] vorgesehen werden.

Die Forderungen an einen hochwertigen Vorschubantrieb sind

- Vier-Quadranten-Betrieb
- hohe Vorschubgeschwindigkeit (1,2 m/min; Eilgang $\geqq$ 10 m/min mit steigender Tendenz)
- hoher Stellbereich ($S \gg 1000$) bei stetiger, energiearmer Einstellung
- kleine Anregelzeit (10 bis 50 ms), optimale Hochlauf- und Bremszeiten ($\approx$ 100 ms)
- kleine Getriebelose ($<$ 10 bis 20 μm)
- kleine Regelabweichung ($<$ 20 bis 200 μm) bei unterschiedlicher Belastung.

Für komplette elektrische Gleichstromantriebe ist eine Typenreihe gemäß Tafel 6.1 etwa erreichbar (s. a. RGW-RS 3745-73 „Komplette reaktionsschnelle Gleichstromantriebe"). Diese Aufgabenstellung läßt sich bei Drehmomenten bis 3,5 Nm mit Transistor-Pulsstellern, bei höheren Werten mit Thyristor-Umkehrstromrichtern erfüllen. Thyristor-Pulssteller DG Se 220/22 bzw. /50 [6.20] bis [6.22] haben sich aus ökonomischen Gründen gegenüber Umkehrstromrichtern und Transistor-Pulsstellern nicht durchsetzen können.

Tafel 6.1. Typenreihe für Gleichstrom-Vorschubantriebe (Motoren s. TGL 34020, Entw. 4.76)

Antriebstyp ($\triangleq M_{D\,\mathrm{Mot}}$)	Dauerdrehmoment (S1-Betr.) d. Antr. M_D Nm	Max. Drehmoment bei 0,5 $n_{\max}$ d. Antr. $M_{\max}$ Nm	Nenndrehzahl ($\approx 0{,}5\ n_{\max}$) d. Antr. n_N U/min	Max. Drehzahl des Antriebs $n_{\max}$ U/min	Min. Drehzahl des Antriebs $n_{\min}$ U/min	Trägheitsmoment J_{Mot} kg · m² · 10^{-4}	
0,75	0,75	6,0	1500	3000	1,5	1,3	
1,7	1,7	4,9[1])	1500	4500	1,5	4,5	
1,7	1,7	7,7[1])	1500	3000	1,5	4,5	Transistor-Pulssteller
3,5	3,5	5,9[1])	1500	4500	1,5	19,0	
3,5	3,5	8,6[1])	1500	3000	1,5	19,0	
7,0	6,0	26,0	1500	3000	1,5	38	
13,0	11,0	45,0	500 ··· 750	1000 ··· 1500	0,5	165	
23,0	19,0	90,0	500 ··· 750	1000 ··· 1500	0,5	270	Thyristorsteller, dreipulsig
35,0	28,0	130,0	500 ··· 750	1000 ··· 1500	0,5	440	
47,0	38,0	180,0	500 ··· 750	1000 ··· 1500	0,5	600	

[1]) Durch Strombegrenzung im Steller eingeschränkte Überlastung

Die Spannungseinstellung bei Gleichstrom-Pulsstellern erfolgt durch Variation der Impulsdauer der positiven oder negativen Gleichspannungen, wodurch sich jeder beliebige Mittelwert $-U \cdots 0 \cdots +U$ am Motor einstellen läßt. Bild 6.11 zeigt das Grundprinzip. Der Motor (e_2, R) mit der Glättungsdrossel *L2* wegen der lückenden Spannung wird an e_1 gelegt, $i_1 = i_2$. *L2* speichert Energie, die Freilaufdiode *Gr* ist gesperrt. Wird *S* geöffnet, fließt i_2 weiter über *Gr*, angetrieben

von e_{L2}, und zwar gegen e_2; die Stromstärke fällt ab. (Im Betrieb wird in dieser Periode auch u_2 entgegengeschaltet.)

$$u_{2m} = e_1 \frac{t_e}{\tau} = e_1 (t_e f) \tag{6.35}$$

$$i_{1m} = i_{2m} (t_e f) = \frac{u_{2m}}{R} (t_e f); \tag{6.36}$$

$t_e f$ hat die Bedeutung des Übersetzungsverhältnisses wie beim Transformator.

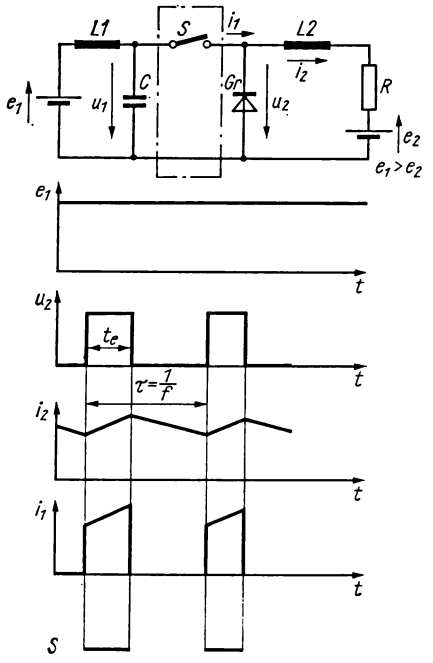


Bild 6.11. Prinzip Gleichstrom-Pulssteller

Durch die ungleichförmige Belastung der Quelle e_1 sind Eingangsglättungsglieder (*L1*, *C*) nötig ($f_{\text{Eigen}} < f_{\text{Schalt}}$). Gleichmäßigere Belastung erreicht man durch mehrere, mit versetztem Takt arbeitende Steller an einer Quelle. *C* nimmt auch die Bremsenergie auf und legt die obere Leistungsgrenze für die Gs-Steller fest, *L1* begrenzt den Kurzschlußstrom.

Zwei Betriebsarten sind gleichwertig:

- Dreipunktsteuerung mit 2 gesteuerten Halbleiterschaltern (entsprechend *T2*, *T4* im Bild 6.12), wobei am Motor $+U_e$, 0, $-U_e$ liegt, der Motor also nicht immer geführt wird.
- Zweipunktsteuerung mit 4 gesteuerten Halbleiterschaltern gemäß den Bildern 6.12 und 6.13 [6.23] [6.24].

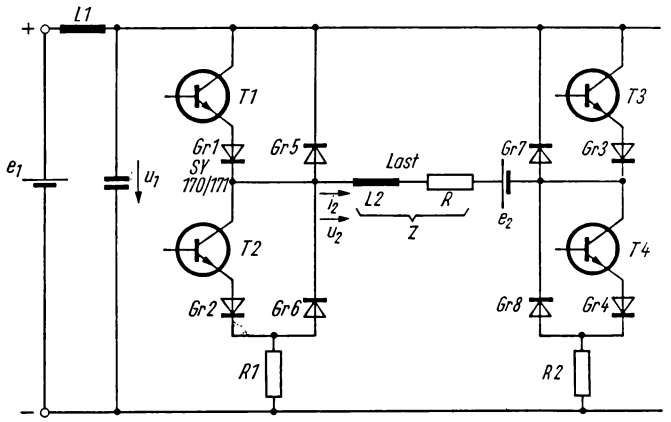


Bild 6.12. Transistor-Pulssteller für Vier-Quadranten-Betrieb

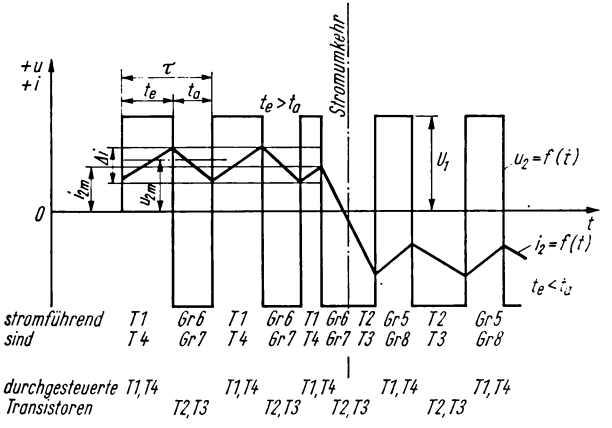


Bild 6.13. Strom-Spannungs-Verhältnisse beim Gs-Pulssteller

Ständig sind zwei diagonale Zweige angesteuert ($\Delta i \approx 1$ bis 1,5 A), wobei sich aus dem Tastverhältnis $t_e : t_a$ Stromrichtung und mittlere Spannung u_{2m} und aus $(U_1 - e_2) : Z$ der i_2 ergibt. Die Spannung am Verbraucher wechselt ständig die Richtung, kontinuierlichen Stromfluß bewirkt die gespeicherte Energie in *L2*. i_{2m} wird vom abverlangten Drehmoment bestimmt. Der abfallende Strom fließt über die Freilaufdioden *Gr6* und *Gr7* bei $i_2 > 0$, *Gr5* und *Gr8* bei $i_2 < 0$ gegen u_1 weiter. Δi wird unabhängig vom Laststrom i_2 von der Hysterese des Zweipunktreglers bestimmt. Es tritt auch bei $u_2 = 0$ auf, so daß ständig Strom (kein „Lücken" des Laststroms) zur Führung des Motors fließt. Das ergibt großen

Stellbereich und beseitigt auch bei kleiner Spannung u_{2m} die Unempfindlichkeit des Motors. Eine Pulsfrequenz von $f_T = 1$ bis 2 kHz stellt ein Optimum dar.

Strom-Differenz-Meßverstärker und Zweipunkt-Stromregler sind mit integrierten Operationsverstärkern A 109 ausgeführt. Das Kippverhalten wird durch überkritische Rückkopplung ($R_{\text{Rück}} < R_i$) erhalten. Wegen hier nicht zu beschreibender Potentialverhältnisse im Gs-Zwischenkreis sind die Transistoren potentialfrei (Nullschienentechnik) mit Übertragern anzusteuern, diese wiederum werden zum Erhalt des Gs-Anteils mit modulierter Spannung (100-kHz-Träger) beaufschlagt, wodurch die Impulslänge zum Ansteuern der Schalttransistoren unbeschränkt ist. Der Impulsverteiler läßt sich extern blockieren.

Beim direkten Umschalten von einem Transistorpaar zum anderen entstehen für etwa 5 bis 10 µs Kurzschlüsse ($I_K = 10$ bis 30 A), resultierend aus der Speicherzeit der Transistoren und Glättungskondensatoren und den relativ langsamen Freilaufdioden *Gr5* bis *Gr8* im Bild 6.12. Die Begrenzung mit Kommutierungsdrosseln in Reihe mit den Transistoren bringt erhöhte Ausschaltüberspannungen und scheidet wegen der Spannungsfestigkeit der Transistoren aus. Deshalb wurde eine digitale Verzögerung (4 bit) des Einschaltimpulses ($t_{\text{tot}} = 30\,\mu\text{s}$) des Gegenpaares vorgesehen. Die Transistoren werden mit einer R-C-Kombination beschaltet [5.41] ($R \leqq 10\ \Omega/10$ W, $C = 0{,}22\ \mu\text{F}/630$ V) [6.25]. Die $i_2 = f(u_1)$-Kennlinie ist etwa linear.

Eine langsamere Diode ($t_{\text{Ein Diode}} > t_{\text{Ein Trans.}}$) (*Gr1* bis *Gr4*) verhindert zu großen Stromanstieg und senkt den Kommutierungsstrom.

Bei Parallelschaltung von 2 bis 4 Transistoren je Brückenzweig sind $n \cdot 8$A beim Typ KU 607 schaltbar, bei $n = 3$; 4 müssen zur Lastverteilung Widerstände in die Emitterkreise ($\leqq 0{,}6\ \Omega$) eingebaut werden. Der Transistorpulssteller 1,8 Nm weist mit dem Motor GSM 45.2 ($n_N = 1500\ \text{min}^{-1}$) folgende dynamischen Werte auf:

t_H bei $I_{\text{Last}} = I_{\text{Mot}}$	$\leqq 30$ ms
t_{rev} von $(-0{,}5 \cdots 0 \cdots +0{,}5) \cdot n_{\max}$	$\leqq 50$ ms
t_{an} (stoßförmige Belastung)	$\leqq 0{,}25$ ms
$n_{\min}$	$\approx 1\ \text{min}^{-1}$
S	1:2000

$f_T = 1{,}5$ kHz [6.26].

Die Schnelligkeit der Regelung ist von der Pulsfrequenz f_T direkt abhängig, diese wieder von den Transistordaten, den zulässigen $\text{d}i/\text{d}t$ im Anker und τ_{Mot}.

Transistorisierte Gs-Steller haben wenig Spannungsreserve, der Überspannungsschutz wird deshalb zur primären Aufgabe.

Motoren für größere Drehmomente werden mit netzgelöschten Thyristor-Umkehrstromrichtern angesteuert.

Selbstgeführte bzw. zwangskommutierte Schaltungen – zu letzteren gehört u. a. der Pulssteller – kommen nicht bzw. nur ausnahmsweise mit Thyristoren zur Anwendung.

Verbreitet ist die dreipulsige Mittelpunktschaltung mit einstellbarem Kreisstrom (Bild 6.14) und bei Inkaufnahme einer höheren Welligkeit der Gleichspannung auch die zweipulsige Brückenschaltung (Bild 6.15) [6.15] [6.18] [6.27], bei der das Moment gegenüber Speisung mit reinem Gleichstrom auf etwa 60% ab-

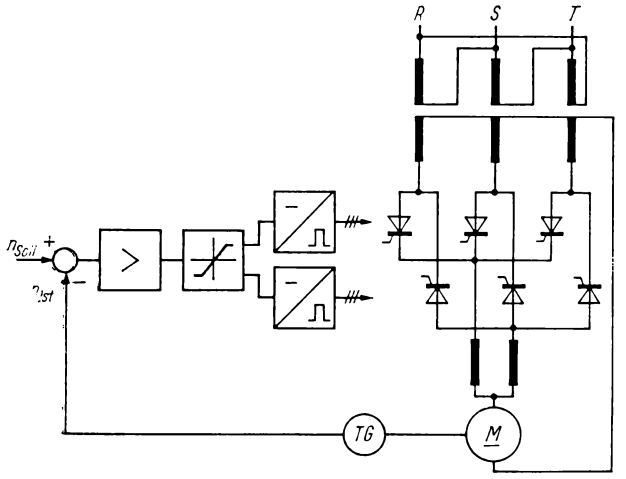


Bild 6.14. Dreipulsiger Umkehrstromrichter in Gegenparallelschaltung

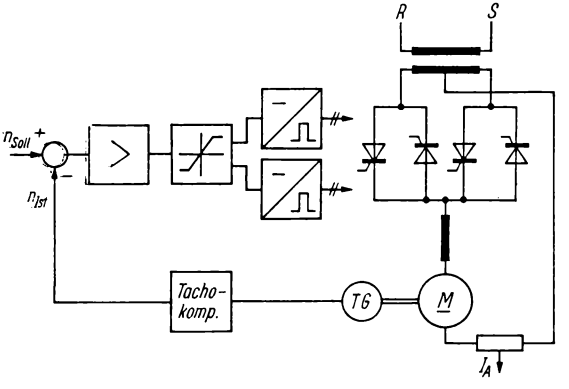


Bild 6.15. Zweipulsige Brückenschaltung für Umkehrantrieb

sinkt. Den hohen Stellbereich erhält man durch Adaption der Verstärkung (P-Anteil) und der Nachstellzeit (I-Anteil) des Drehzahlreglers bei niedrigen Drehzahlen.

Meist verzichtet man auf eine die Dynamik verschlechternde unterlagerte Stromregelung und arbeitet mit Strombegrenzung, die den zur Umsteuerung für $\leqq$ 200 ms erforderlichen, etwa 7- bis 10fachen Kurzzeitgrenzstrom erlaubt, bei länger anhaltender großer Regelabweichung jedoch wirksam wird. Die Spieldauer soll dabei mindestens 10 s sein, bei kleineren Werten ist der Grenzstrom zu verringern [6.28].

Stromrichtergeräte werden in Kompaktbauweise hergestellt. Unter Verzicht auf superflinken Kurzschlußschutz erfolgt die Abschaltung bei Havarie im Antrieb durch Impulssperre [6.29].

Die im Aufwand gegenüber der zweipulsigen Schaltung etwa gleichwertige dreipulsige Schaltung hat 1,5fache Pulsfrequenz, benötigt damit kleinere Kreisstromdrosseln und ergibt wegen des gleichmäßigeren Drehmoments bessere dynamische Eigenschaften.

Für dreipulsige Schaltungen werden Totzeiten von etwa 3,3 ms ($\triangleq$ stat. Totzeit des Thyristors) und Anregelzeiten von 18 ms erreicht.

Für zweipulsigen Betrieb werden Motoren mit etwas größerem Trägheitsmoment eingesetzt. In [6.9] wird für eine 6polige Thyristorschaltung $t_{an} = 9$ ms ($n_N = 1000$ U/min), d. h. 2 bis 3 Zündperioden, angegeben. Dieser Antrieb ist dynamisch sehr hochwertig, aber zu aufwendig. $I \sim M$ gilt auch im Überlastbereich ($\mathrm{d}i/\mathrm{d}t \leqq 2000\, i_N/\mathrm{s}$).

6.2.3.2. *Gleichstrom-Stellmotoren*

Die Optimierung eines Vorschubantriebs erfordert vor allem geeignete Stellmotoren mit

- möglichst geringem Trägheitsmoment zum Erreichen guter Dynamik
- großem Verhältnis Moment/Trägheitsmoment bzw. Moment/Masse
- großem Stellbereich.

Ihre Baugröße hängt vom Drehmoment ab, überdimensionierte Motoren verbessern die Dynamik nicht, erfordern jedoch ein größeres Stellglied. Die optimale Drehzahl ergibt sich aus der proportional mit n steigenden Hochlaufzeit und den gleichermaßen sinkenden Kosten (Motor wird kleiner) als Kompromiß zu 1000 bis 3000 U/min. Für größere Drehmomente setzen sich Langsamläufer zur direkten Kopplung mit der Spindel weiter durch. Bei kleinen Drehzahlen sinkt das Motormoment bis auf 80% von M_D ab.

Die DDR-Stellmotoren GSM werden in 5 Typen, $n_N = 1500$ U/min (4polig) IP 22, angeboten. Weiterentwicklung als WSM-Reihe 17 bis 47 Nm ist vorgesehen (s. TGL 34020, Entwurf April 1976) [6.30].

	M_D Nm	U_N V	I_N A	J kgm²	m kg	τ_{el} ms
GSM 35.2:	0,85	60	4,5	$1{,}3 \cdot 10^{-4}$	6,4	1,5
45.2:	1,8	60	9,3	$4{,}2 \cdot 10^{-4}$	9,4	1,8
58.2:	4,0	60	24,0	$14 \cdot 10^{-4}$	20	2,0
70.1:	6,0	110	19,0	$30 \cdot 10^{-4}$	27	2,3
70.2:	7,0	110	26,0	$38 \cdot 10^{-4}$	37	1,8

Sie sind permanenterregt, haben schlanken Anker, Flanschdurchmesser 140 bis 250 mm, Gesamtlänge 380 bis 520 mm; $n_{max} = 2625$ U/min, $n_{min} \approx 1$ U/min, $\varepsilon = 9000$ bis 16000 rad/s².

Die GSM sind für den Anbau eines Tachogenerators K5 A1 von MEZ Brno vorbereitet.

Von einem Tacho, zunehmend in Hohlwellenausführung, wird verlangt:

Ausgangsspannung im Leerlauf U	$2 \cdots 20$ V/1000 U/min
Linearitätsabweichung	1%
Welligkeit im Leerlauf	$100 \frac{\Delta U}{U} \leqq 0{,}5\%$
R_{Last}	5 kΩ/V
$J_{\text{Läufer}}$	$\approx 0{,}1 \cdot 10^{-4}$ kgm²

Die flachen, eisenlosen Scheibenläufermotoren [6.31] haben keine ausgeprägten Pole (Permanentmagnetfeld), sind dadurch an beliebiger Stelle positionierbar und geben ein Moment unabhängig vom Drehwinkel α ab. Wegen der guten Wärmeabstrahlung sind sie 10fach überlastbar und erlauben die höheren Wirbelstromverluste hochtourigen Betriebs. Motor und Tacho können als Doppelmotor mit gemeinsamer Welle aufgebaut sein, die zur Erhöhung des Anfahrmoments auch elektrisch hintereinanderzuschalten sind. Ihre Hochlaufzeit liegt bei 20 bis 30 ms ($J_{\text{Mot}} = J_{\text{Last}}$); Ankerwiderstand ($1 \cdots 2\ \Omega$) und Nennspannung ($9 \cdots 36$ V) gestatten gute Anpassung an Transistorschaltungen. Nachteilig ist die flache Bauform, die einen ungünstigen Anbau mit sich bringt.

Etwa gleiche dynamische Eigenschaften weisen der mit nutenlosem Läufer ausgestattete lange, schlanke, schnellaufende Minertia-Motor (Stabläufer $M_N = 0{,}6 \cdots 20$ Nm) sowie Hohl-(Glocken-)läufermotoren auf [6.32]. Die Hochlaufzeit liegt bei 35 bis 50 ms.

Vergleich der mechanischen Zeitkonstanten:

normaler GS-Motor	$\tau_{\text{mech}} = 20 \cdots 50$ ms
Scheibenläufer	$4 \cdots 10$ ms
Stabläufer	$3 \cdots 5$ ms
Glockenläufer	$2 \cdots 6$ ms
Gs-Stellmotor GSM	$4{,}5 \cdots 6$ ms.

Die Motoren werden zunehmend komplett mit Tacho (und Resolver) geliefert einschließlich spielfreier Meßgetriebe mit einer Übersetzung 1:1 bis 1:2,5. Für Werkzeugmaschinen wird neben der offenen (IP 22) auch eine geschlossene (IP 54) Motorausführung benötigt, wodurch die Wicklung in Isolationsklasse F bis H auszuführen ist.

Im RGW sind Stellmotoren in der Empfehlung RS 3745–73 vorgegeben.

6.2.3.3. *Elektrohydraulischer Antrieb* [6.33]

Ein elektrohydraulischer Antrieb erfüllt die gleichen Forderungen wie der elektrische Antrieb (Steife, kurze Hochlauf- und Bremszeiten, großer Regelbereich). Durch die hohe Energiedichte sind die Stellglieder und deren Trägheitsmoment klein (25% von J_{Mot}).

Im Servoventil wird elektromagnetisch durch Zungenverstellung das Brückengleichgewicht verändert, das zum Ölfluß im Vorsteuerkreis und daraus zur Verschiebung des Hauptsteuerkolbens führt (Vierkantensteuerungssystem). Die statische Kennlinie $n = f(i_{St})$ weist eine geringe Nichtlinearität am Nullpunkt (sinkende Kreisverstärkung) und Hysterese (statischer Fehler) auf. Genügend große Kreisverstärkung ist durch Rückführbeschaltung (Phasenvorhalt) zu erreichen.

Normierte Kennlinie (Bild 6.16):

$$\frac{Q}{Q_{max}} = \frac{x}{x_{max}} \sqrt{1 - \frac{\Delta p}{p_{max}}}; \tag{6.37}$$

Δp Druckdifferenz, x Steuerspalte, $Q \sim n$ Öldurchsatz.

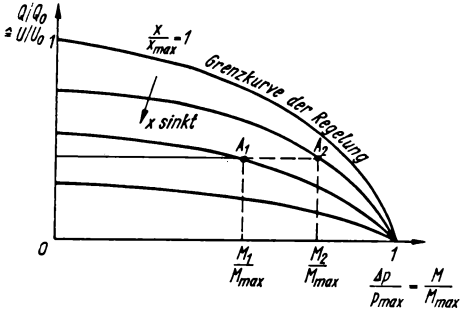


Bild 6.16. Kennlinienfeld eines Servoventils

Durch den Druckabfall an den Steuerkanten steht das maximale Moment (oft als Nennmoment bezeichnet) nur bei Stillstand ($Q/Q_{max} = 0 \rightarrow \Delta p/p_{max} = 1$) zur Verfügung. Der schlechte Anlagenwirkungsgrad ($\eta = 0{,}1$) führt zu starker Erwärmung auch an der Maschine und hohem Kühlaufwand. Deshalb wird konstante Öltemperatur (50 °C) verlangt, was längere Anfahrzeiten verursacht.

Hydromotoren werden meist als Axialkolbenmotoren ausgeführt [6.11], Schubkolbenmotoren sind für kurze Wege bei großer Kraft vorteilhaft einsetzbar (Spannen, Zuführen), Rollflügelmotoren sind laut. Wegen der besseren Energiezufuhr und der Beibehaltung der elektrischen Energieform bis zur Wandlung in mechanische Energie setzt sich der Elektroantrieb rasch durch.

6.2.3.4. *Schrittantrieb*

Als weitere Antriebskonzeption steht der als DA-Wandler wirkende Schrittmotor zur Verfügung, mit dem zu einer offenen Steuerkette unter Wegfall separater Meßwertgeber übergegangen werden kann. Der Schrittmotor paßt sich der digitalen Arbeitsweise voll an und garantiert innerhalb der Grenzdaten fehlerfreies Nachfolgen der vorgegebenen Impulsreihen. Der frequenz- und momentabhängige Nachlauffehler wird bis zum Stillstand abgebaut.

Bezüglich Auflösung und Drehmoment erscheint eine Bauart mit 5 Systemen (Bild 6.17) am günstigsten. Jedes System hat einen Ständer und einen Läufer. Beide sind magnetisch gegeneinander abgeschirmt und in Achsrichtung genutet, die Läufernuten sind fluchtend, die Ständersysteme um $\tau_p/5$ versetzt angeordnet [6.34] [6.35]. Eine 24polige Ausführung erreicht bei einfacher Ansteuerung der Ständer den Schrittwinkel $\varphi = 360:(24 \cdot 5) = 3°$. Höheres Drehmoment und Schrittweiten von 1,5° verlangen 3–2–3-Ansteuerung (Bild 6.18).

Der Läufer wird in die Stellung des kleinsten magnetischen Widerstands gedreht. Sind 3 Systeme erregt, ist die Wirkung so, als wäre nur das mittlere angesteuert, bei 2 Systemen liegt die stabile Lage in deren Mitte.

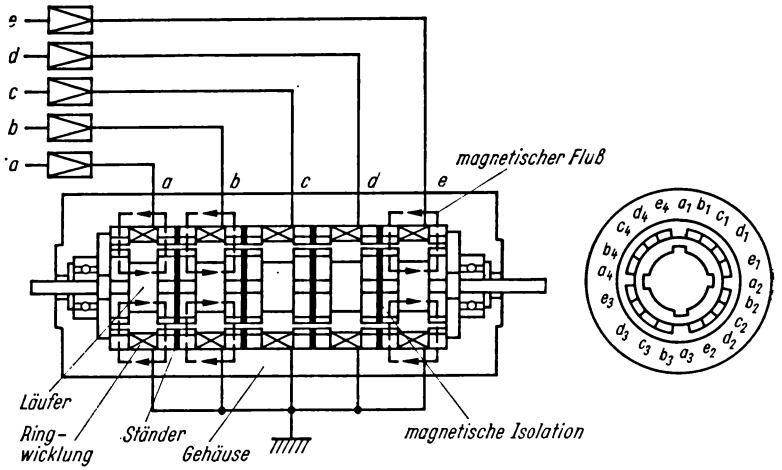


Bild 6.17. Schrittmotoraufbau [6.34] (5 Systeme, 4 Pole)

	Takt									
Ständersystem	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	×	×	×						×	×
2	×	×	×	×	×					
3			×	×	×	×	×			
4					×	×	×	×	×	
5	×						×	×	×	×

← links , → rechts

Bild 6.18. 3-2-3-Ansteuerung

Aus Bild 6.18 erkennt man, daß die Zuleitungen zum Schrittmotor nur mit $f/10$ beaufschlagt werden und die Ansteuerung quasistatisch erfolgt. Mit den niederohmigen Ständerwicklungen und den hohen Steuerströmen ist sie störunempfindlich. Durch den Stromfluß auch im Stillstand steht ein ausreichendes Haltemoment zur Verfügung.

Für den Schrittantrieb gilt speziell:

$$n = f \cdot \varphi \cdot \frac{1}{6}; \tag{6.38}$$

n in min^{-1}, f in s^{-1}, φ in °.

$$P = c_1 M f \varphi \tag{6.39}$$

$$M = c_2 I \varphi f^2 \text{ mit } c_2 \approx 5 \cdot 10^{-6}. \tag{6.40}$$

In der DDR wird ein rotatorisch inkrementales Stellsystem IPS vom VEB Carl Zeiss JENA gefertigt, und zwar mit 5 (IPS 5-3/3) bzw. 3 (IPS 3-1,5/5) Systemen. Die zweite Ziffer gibt das Haltemoment, die dritte den konstruktiven Stellwinkel an [6.35]. Die Startfrequenz ist im Bild 6.19 angegeben. Das geringe Moment gestattet keinen direkten Antrieb.

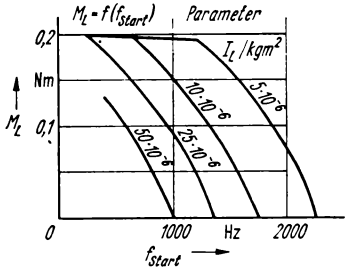


Bild 6.19. Startkennlinie für IPS

Die Auffächerung der Impulse erfolgt in der Ansteuerelektronik (ASE) (Bild 6.20).

Schrittmotoren lassen sich im Vorschubbereich nur bis $f_{Start/Stopp} \approx 2000$ Hz (auch bei Reversieren!) betreiben. Weitere Beschleunigung bis 16 kHz erfordert Führung nach einer e-Funktion (Bild 6.21).

Zur Erhöhung des Drehmoments kombiniert man den Schrittmotor mit Hydraulikverstärker zum „elektrohydraulischen Schrittmotor" als Folgeregelkreis. Eine geniale Lösung stellt dabei die Konstruktion der Firma Fujitsu Ltd., Tokio, dar (Bild 6.22) [6.34]. Man erkauft sich jedoch die Nachteile der Hydraulik, weshalb der Gleichstromantrieb oft vorgezogen wird. Neuerdings sind japanische Konstruktionen von elektrischen Hochleistungs-Schrittmotoren bis 16 kHz bekannt geworden.

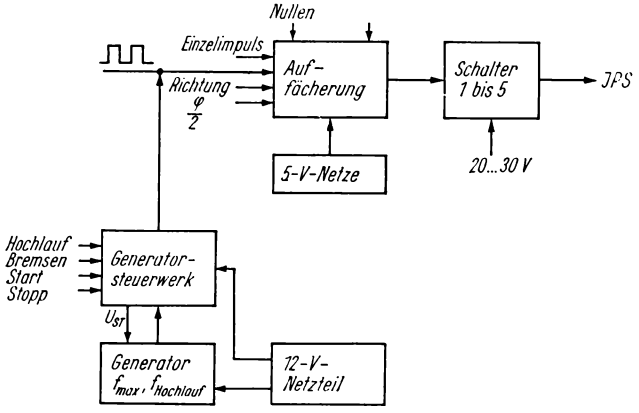


Bild 6.20. Ansteuerelektronik für IPS

Vom Schrittmotor (Bild 6.22) wird der den Ölfluß steuernde Kolben gedreht und dadurch axial mit Gewindezapfen und Mutter im Ölmotor bewegt, wodurch je nach Bewegungsrichtung Steuerkanten freigegeben werden. Der Öldruck dreht mittels Axialkolbens und kugelgelagerter Schrägscheibe den Hydromotor, wobei ein 100faches Drehmoment abgenommen werden kann und gleichzeitig die Mutter über den Gewindezapfen den Steuerkolben in die Nullage zurückschiebt, womit der Ölfluß unterbrochen wird.

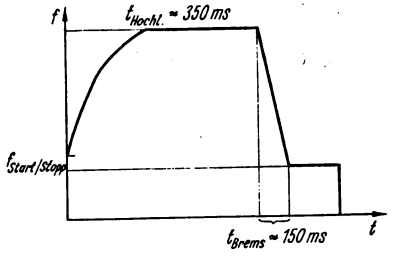


Bild 6.21. $f = g(t)$-Kennlinie für IPS

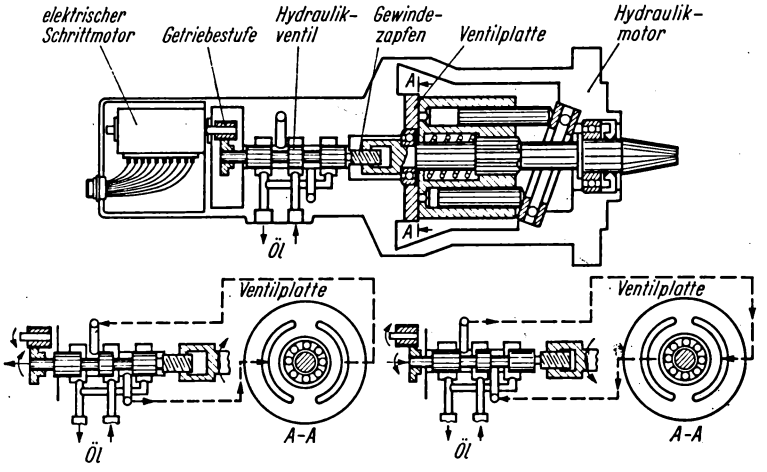


Bild 6.22. Schrittmotor [6.34]

Im Verschiebeweg des Steuerkolbens lassen sich etwa ±300 Schritte mechanisch speichern, die sicher bis Null ohne Überschwingen abgearbeitet werden, wodurch auch größere Massen beschleunigt werden können. Bei 10 Schritte/s läuft der Ölstrom dauernd, und ab 150 Schritte/s ist die Winkelgeschwindigkeit nicht mehr pulsierend [6.34].

Der Einfahrvorgang (Bild 6.23) ergibt ein ständiges Verkleinern des Schleppfehlers ($\Delta s_2 < \Delta s_1$), bei 2000 Schritte/s bleibt der elektrische Schrittmotor sofort stehen, der Hydraulikmotor (I-Verhalten) läuft bis $s = s_{Soll}$ nach. (Beachte:

im Bild 6.23 ist die Ordinateneinteilung nicht zugeordnet, 4,8 m/min ≙ 8 kHz bei $\Delta s = 0{,}01$ mm.)

Die Traktrix (Schleppfehler) kann durch Programmieren von Verweilzeit an Ecken verhindert werden.

Durch die Momentenverstärkung verbessert sich die Kennlinie nach Bild 6.24 [6.34].

Schwingungserscheinungen können auftreten, wenn die Resonanzfrequenz (oder eine Oberwelle) der Maschine mit der Pulsfrequenz übereinstimmt. Ihrer Beseitigung dienen mechanische Schwingungsdämpfer.

Der Drehmomentenverlauf ist etwa sinusförmig (Bild 6.25) [3.36]. Die Übergangsfunktion (Bild 6.26) hat bei nachgeschaltetem Hydraulikmotor aperiodischen Charakter.

Bei der üblichen Auflösung von 0,01 mm sind mit $f_{\text{Start/Stopp}} = 2$ kHz 1,2 m/min Vorschub und mit 16 kHz 9,6 m/min Eilgang erreichbar. Elektrische und elektrohydraulische Schrittmotoren sind auch für Bahnsteuerungen geeignet.

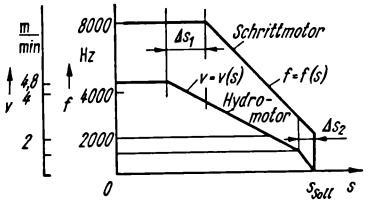


Bild 6.23. Einfahrvorgang [6.34]

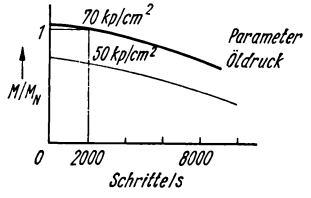


Bild 6.24. Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie des elektrohydraulischen Schrittmotors

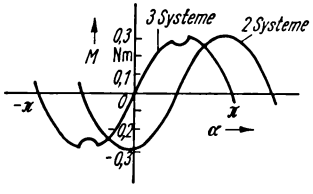


Bild 6.25. Statische Momentenkennlinie des elektrischen Schrittmotors

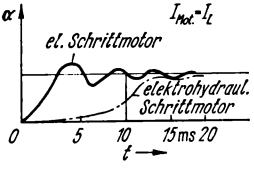


Bild 6.26. Übergangsfunktionen bei einem Impuls

6.2.4. Abschaltkreis, Lageregelkreis

Beim Einsatz eines geregelten Antriebs an einer NCM sind zu unterscheiden (s. a. Abschn. 2.2.):

- Abschaltkreise mit gestufter Sollwertvorgabe an den drehzahlgeregelten Antrieb beim Positionieren
- Lageregelkreise mit stetiger Sollwertvorgabe der Lageabweichung an den drehzahlgeregelten Antrieb während des gesamten Bearbeitungsvorgangs.

6.2.4.1. *Abschaltkreis*

Bei konstantem Bremsmoment $M \sim \varepsilon$ ($\ddot{s} = \dot{v} = b \sim \varepsilon$) erfolgt die Geschwindigkeitsreduzierung bei einem Sollwertsprung parabelförmig:

$$\left.\begin{aligned} v &= b\,t_B \\ s &= b\,\frac{t_B^2}{2} \end{aligned}\right\} \rightarrow v^2 = 2\,b\,s \quad \text{mit } v_0 = 0,\ s_0 = 0. \tag{6.41}$$

Doppelt logarithmisch aufgetragen ergeben sich Geraden (Bild 6.27). Bei der Erörterung des Rechenzyklus der Punkt-Strecken-Steuerung ergab sich eine Zykluszeit $t_Z' = 1{,}36$ ms (s. Abschn. 5.7.1.). Im ungünstigsten Fall wird in dieser „Totzeit" der niedrigere Vorschub wirksam

$$s_i = v_i\,t_Z'\,SZ = v_i\,t_Z; \tag{6.42}$$

SZ Sicherheitszuschlag,

indem vor der günstigsten Position B_i das Vorabschaltsignal bereits bei A_i gegeben wird. Die Verschlechterung der Positionierzeit je Stufe beträgt

$$\Delta t \leqq \frac{v_i\,t_Z}{v_{i+1}}. \tag{6.43}$$

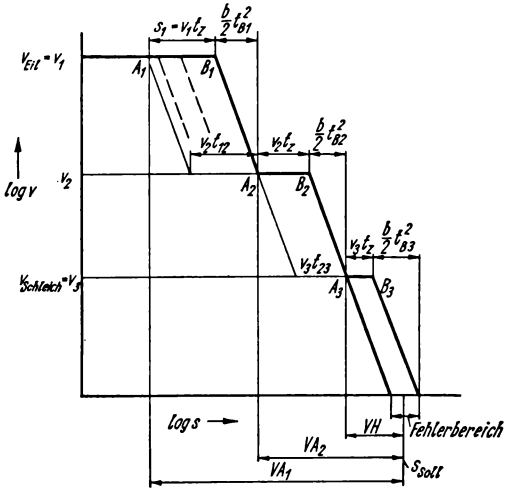


Bild 6.27. Positionieren, Abschaltkreis

Bei richtig dimensioniertem Vorhalt VH wird der Sollwert nur um $\pm s_3/2$ verfehlt. Dieser Wert ist z. B. bei $v_3 = 12$ mm/min $= 0{,}2$ µm/ms völlig unkritisch. Die Positionierzeit t_p ab A_1 ist eine Maschinenkenngröße:

$$(k-1)\,t_Z + \sum_{i=1}^{k} t_{Bi} \leqq t_p \leqq \sum_{i=1}^{k} t_{Bi} + \sum_{i=1}^{k-1} t_Z \frac{v_i}{v_{i+1}}, \tag{6.44}$$

wobei $\sum_{i=1}^{k} t_{Bi} = \frac{v_{\text{Eil}}}{b}$;

k Anzahl der Geschwindigkeitsstufen einschließlich Eil- und Schleichgang (Bild 6.27 $k = 3$).

Aus Gl. (6.44) läßt sich der Extremwert berechnen [3.2] [6.37], für den die ungünstigste Zeit ein Minimum wird:

$$v_i = \sqrt{v_{i+1} \cdot v_{i-1}}, \tag{6.45}$$

also eine geometrische Folge mit

$$q = \sqrt[k-1]{\frac{v_{\text{Eil}}}{v_{\text{Schleich}}}} = \sqrt[k-1]{S}. \tag{6.46}$$

Damit werden $t_{\min} = t_B + k\,t_Z$ (6.47)

$$t_{\max} = t_B + t_Z\,q\,(k-1). \tag{6.48}$$

Die günstigste Stufung ergibt sich aus Gl. (6.48) mit konstanten t_B und t_Z zu

$$y = q\,(k-1) = \sqrt[k-1]{S}\,(k-1) \rightarrow \text{Minimum}. \tag{6.49}$$

Nach logarithmischer Differentiation

$$\frac{1}{y}\,y' = -\frac{\ln S}{(k-1)^2} + \frac{1}{k-1}$$

$$y' = \left(\frac{-\ln S}{(k-1)^2} + \frac{1}{k-1}\right) \sqrt[k-1]{S}\,(k-1) = 0$$

$$\left(1 - \frac{\ln S}{k-1}\right) \sqrt[k-1]{S} = 0.$$

Der erste Faktor kann nun verschwinden:

$$k - 1 = \ln S. \tag{6.50}$$

$k \geqq 6$ wird nicht ausgeführt, da in diesem Fall

$$t_Z\,q\,(k-1) \ll t_B \text{ ist.}$$

6.2.4.2. *Lageregelkreis*

Bei bahngesteuerten Achsen und zunehmend bei Streckensteuerungen wird eine ständig geschlossene, meist digitale Lageregelung angewendet (Bild 6.28). Damit werden Störfaktoren, wie Reibung (Temperatur), bewegte Masse, Bremsmoment,

Geschwindigkeit zum Zeitpunkt der Koinzidenzabschaltung u. ä. erfaßt. Bei zeitsynchroner Bewegung von Achsen kann nur durch Lageregelung deren Nachführen zur Sollkurve garantiert werden. Bei Punkt-Strecken-Steuerungen muß wegen der Regelreserve $M_D < M_{D\,max}$ sein, so daß geregeltes Einfahren kaum schneller

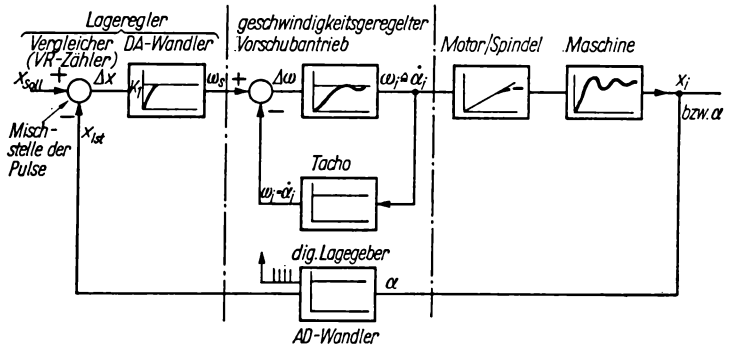


Bild 6.28. Lageregelkreis, digital

geht als mit Abschaltkreis, zumal die Toleranzstrecken sehr klein sind. Der wichtigste Parameter ist die Geschwindigkeitsverstärkung k_v, die den Nachlauffehler bestimmt. Besonders bei Maschinen großer Dimensionen kann deren Feder-Masse-System im Regelkreis bei direkter Wegmessung Schwingungen und Unstabilität ergeben, die einen Anschaltkreis oder zumindest ein Öffnen des Lageregelkreises im Koinzidenzpunkt (überlagerter Korrekturkreis) bedingen.

Direkt mit dem Motor gekoppelte indirekte Meßwertgeber eliminieren die Maschine nahezu aus dem Regelkreis.

Die unterlagerte analoge Geschwindigkeitsregelung verbessert die Dynamik des Lageregelkreises wesentlich. Dabei gilt die Faustregel [6.38] [ω Bandbreite, s. a. Gl. (6.34)]:

$$\omega_{0\ Masch} = (2\cdots5)\,\omega_{Geschw.\text{-}Regelg.};$$

$$\omega_{Geschw.\text{-}Regelg.} = (3\cdots5)\,\omega_{Lageregelg.} \tag{6.51}$$

Auf Grund der digitalen Arbeitsweise wird der Lageregelkreis zu diskreten Zeiten beaufschlagt, d. h., die Führungsgröße ist eine Abtastfunktion (Bild 6.29).

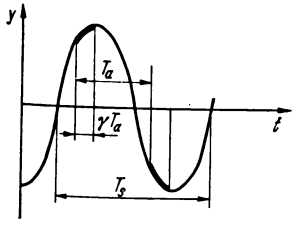


Bild 6.29. Abtastregelung

Hierbei gilt das von *Shannon* bzw. *Kotelnikow* abgeleitete Abtasttheorem [6.19] [6.20] [6.39], um die Originalfunktion ohne Informationsverlust zu rekonstruieren:

$$T_a \leqq 0{,}5\, T_s = \frac{\pi}{\omega_s}; \tag{6.52}$$

T_a Abtastperiode

$f_s = \frac{1}{T_s}$ Frequenz des Signals, höchste nach Fourierzerlegung des Signalverlaufs noch interessierende Frequenz

T_s Streckenzeitkonstante des Regelkreises ohne Schwingungen (bei Wzm $T_s = 5 \cdots 10$ ms [6.41]).

Laut [6.40] gilt für Stabilität $T_a < 0{,}7\, T_{\text{Regelstrecke}}$ [6.41].

Gl. (6.52) läßt die Stützpunktweite bei Bahnsteuerungen ermitteln, deren Unterschreitung zu keiner erhöhten Genauigkeit führt:

$$\Delta s = v_t \frac{1}{2 f_{gL}} = v_t \frac{\pi}{\omega_{gL}} \approx v_t \frac{\pi}{k_v}: \tag{6.53}$$

ω_{gL}, f_{gL} Bandbreite des Lageregelkreises, Grenzfrequenz

$k_v = \frac{v_x}{x_i - x_s} = \frac{v_{\max}}{\Delta x_{\max}}$ Geschwindigkeitsverstärkung des Lageregelkreises

$x_i - x_s = \Delta x$ Nachlauffehler, Regelabweichung (Bild 6.30).

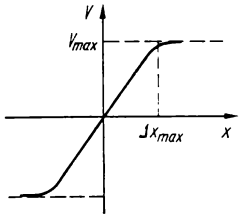


Bild 6.30. Geschwindigkeitsverstärkung $k_v = \frac{v_{\max}}{\Delta x_{\max}}$

Beispiel: $k_v = 50\ \text{s}^{-1}$, $v_t = 1000\ \text{mm min}^{-1}$

$$\Delta s = 1000 \frac{\pi}{50 \cdot 60} = \frac{\pi}{3} \approx 1\ \text{mm}.$$

Die Schrittweite eines festverdrahteten Interpolators ist feststehend, weshalb pas Abtasttheorem für festverdrahtete Steuerungen nicht ausgenutzt werden ɜann [5.12]. Erst beim Übergang zur CNC wäre es möglich, die Stützpunkte geschwindigkeitsabhängig bei Berechnung der Zwischenpunkte direkt aus der Funktionsgleichung (nicht mittels Integration) zu vergrößern. Davon wird bei der CNC der DDR jedoch kein Gebrauch gemacht. Glättung zwischen den Stützpunkten erreicht die Linearinterpolation.

Die mathematische Behandlung erfordert Differenzengleichungen und ist mittels Z-Transformation durchführbar [6.42].

Die Lageregelung ist daher stetig und linear, die Vorschubgeschwindigkeit wird proportional der Lageabweichung geregelt. Auch die feine digitale Stufung des hybriden digital-analogen Lageregelkreises ändert daran nichts.

Der Lageregelkreis setzt sich aus

- Lageregler
- geschwindigkeitsgeregeltem Vorschubantrieb
- Maschinenteilen als Regelstrecke
- Lagemessung

zusammen.

Der Lageregler ist als Vergleicher mit DA-Wandler in Näherung ein P-Glied mit der Verstärkung k_v. Der integrale Anteil und die Verzögerung 1. Ordnung sind zu vernachlässigen [6.43]. Seine Bandbreite ist gering [Gl. (6.51)], so daß er als Tiefpaß wirkt, seine Drift muß kleiner als die einem Bit äquivalente Spannung sein, auf die im Geschwindigkeitsregler die Unempfindlichkeitszone am Nullpunkt ebenfalls abgeglichen ist. In Näherung ist k_v bei Werkzeugmaschinen gleich der Grenzfrequenz der Lageregelung (laut [5.12] mit nur 3 dB Amplitudenabfall im Nyquist-Bode-Diagramm), nach Gl. (6.53) ist $k_v \approx \omega_{gL}$, an Werkzeugmaschinen $k_v = 10 \cdots 50\ \mathrm{s}^{-1}$. Ist die Geschwindigkeitsverstärkung aller Achsen – wie gefordert – gleich, ergibt der Nachlauffehler nur dann einen Formfehler, wenn sich bei Krümmung die Nichtlinearität der v-Kennlinie und die Beschleunigung auswirken [5.40].

An den DA-Wandler als Teil des Lagereglers werden Forderungen nach Linearität, minimaler Totzeit und konstantem Nullpunkt gestellt. Der Ansteuerbereich von 10 V wird in 3 bis 4 Dekaden unterteilt. Wegen der Lagerückführung ist die Kennlinie des DA-Wandlers nicht für die Vorschubgeschwindigkeit maßgebend, ihre Nichtlinearität verändert k_v.

Wird der Lageregelkreis geöffnet, kann von Hand verfahren werden, ohne daß die Istposition verlorengeht. Ein Schließen zur Programmfortsetzung ist jedoch nur erlaubt, wenn die Regelabweichung $\leqq \Delta x_{\max}$. Will man beim Schließen nicht zurückfahren, ist der Zähler im Vergleicher zu nullen.

Die Lageregelung wird zusammengefaßt durch folgende Werte charakterisiert [6.43]:

a) kleinster programmierbarer Schritt

b) Auflösung der Lagemessung

c) kleinster Schritt des Antriebssystems [ohne stick slip kleiner als a)]

d) Unempfindlichkeit der Lageregelung [d) ist größer als b)]

e) Geschwindigkeitsverstärkung k_v

f) Grenzfrequenz des Lageregelkreises (Senkung der Amplitude, Phasennacheilung bei hochfrequenter Erregung)

g) Grenzfrequenz des Vorschubantriebs (Nichtlinearität durch Richtungsumkehr, Reibung)

h) maximale Beschleunigung bzw. Verzögerung

i) Überschwingweite beim Positionieren

j) Stabilität im Stillstand.

In der NC 450 sind Vergleicher und DA-Wandler Bestandteil der Steuerung. x_{Soll} ist eine digitale Impulsfolge, die Geschwindigkeit wird durch deren Frequenz verkörpert, so daß dieser Eingang dem der Ansteuerelektronik für den Schrittmotor gleicht.

Wird der Vergleicher dem Antrieb zugeordnet, erhält man einen digital beaufschlagten Servoantrieb (Positionierantrieb), der verbesserte Eigenschaften bezüglich Anlauf, Stellbereich (bei entsprechend hoher Impulsfrequenz) und Unabhängigkeit vom gewählten Servoregelkreis sowie der Steuerungskonzeption ergibt. Die Stellbewegung muß der Pulsfolge nicht unmittelbar folgen (Speicherung im VR-Zähler), wodurch höhere Eingangsfrequenz (bis 100 kHz), Auflösungen und Stellbereiche gegenüber Schrittmotoren möglich werden.

Neben der digitalen Lagerückmeldung lassen sich auch phasenzyklische Meßwertgeber einsetzen, wobei der Vergleich digital oder der Phasen bzw. Amplituden erfolgen kann, je nachdem, wo die Wandlung erfolgt.

Die Istwerte sind zur Anzeige zu speichern.

Der unterlagerte Geschwindigkeitsregelkreis besteht aus einem PI-Regler und einer Strecke mit P2-Charakteristik. Der Regler entsteht aus einem Verstärker mit nachgebender Rückführung (*R-C*-Beschaltung).

Der Drehzahlregelkreis (Bild 6.31) hat eine Unempfindlichkeitszone im Nullpunkt, weist Begrenzung der Maximaldrehzahl, Hysterese und Dämpfung auf. Der Unempfindlichkeitsbereich (± 10 mV) ist zum Nullpunktabgleich und zur Vermeidung der Drift notwendig. Er wird beim Gs-Pulssteller künstlich durch Dioden in Antiparallelschaltung und einen Kondensator erzielt, womit jedoch eine Nichtlinearität verbunden ist [6.25].

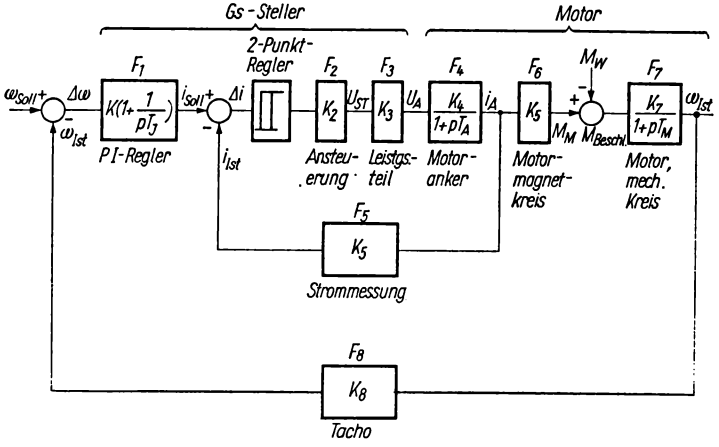


Bild 6.31. Geschwindigkeitsregelkreis mit Pulssteller

Die Regelgröße Drehzahl ($\omega \sim n$) wird durch die Tachospannung dargestellt, wodurch dieser Wandler mit seiner Linearität, dem Temperaturgang und der Langzeitkonstanz voll in die Genauigkeit eingeht.

Die Vorteile einer unterlagerten Stromregelung sind

- Begrenzung des Ankerstroms, keine Motor- bzw. Stellerüberlastung
- Verbesserung des dynamischen Verhaltens durch Verkleinerung der Ankerzeitkonstanten [6.38].

Durch den Stromregelkreis wird der Gs-Motor weich, was eine größere Kreisverstärkung bedingt. Der Kreisverstärkung sind andererseits aus Stabilitätsgründen Grenzen gesetzt, abhängig von der Eigenfrequenz des Kreises Gl. (6.51) [6.44] [6.45] und der Eigendämpfung.

Anstatt Stromregelung wird in modernen Antrieben wegen Verschlechterung der Dynamik meist nur eine Strombegrenzung angewandt.

Zur Vermeidung von Totzeit ist Spielfreiheit zu garantieren. Durch trägheits- und reibungsarme Ausführung der Maschine sinkt die Bedämpfung des Kreises.

Die Strecke im Lageregelkreis bei direkter Messung hat integrales Verhalten (Motorspindel) $F = \dfrac{1}{pT}$ und ist schwingungsfähig wegen ihrer endlichen Steife $F_{\text{Masch}} = \dfrac{K}{1 + 2DpT + p^2T^2}$. Durch das integrierende Stellglied Motor bezüglich seines Abtriebswinkels $\alpha(t) = \int_0^t \omega \, dt$ folgt die Regelgröße einem Eingangssprung ohne bleibende Regelabweichung, während eine Eingangsrampenfunktion $\alpha_e = \omega_0 t$ eine bleibende Regelabweichung, den sog. Geschwindigkeitsfehler, hervorruft. Dieser nimmt mit der Eigenfrequenz der Strecke ab und kann durch Senkung des Vorschubs vermindert werden.

Bei Lageregelkreisen an Bahnsteuerungen mit 10 µm Auflösung soll die Regelabweichung 10 bis 100 µm nicht überschreiten, in der NC 450 wurde bei 90 µm eine Sperre eingebaut. Dazu sind Anregelzeiten von 10 bis 30 ms nötig.

Da die größte Sollwertänderung auch die größte Regelabweichung bedingt und an Ecken bzw. bei sehr kleinen Radien auftritt, ist dann eine Geschwindigkeitsreduzierung (Eckenverzögerung) zu programmieren.

Der PI-Lageregelkreis wird durch die Geschwindigkeitsrückführung $\dot{\alpha}(t)$ (d. h. Senkung der Kreisverstärkung im Lauf, volles Wirken im Stillstand) stabilisiert, und stellvertretend für die Beschleunigungsrückführung $\ddot{\alpha}(t)$ (wegen $\ddot{\alpha} \sim M/\Theta$ und $M \sim I$) kann durch eine Stromrückführung die dynamische Güte erhöht werden.

Die unterlagerten Regelkreise können mit hoher Kreisverstärkung ausgeführt werden, da durch unmittelbare Messung im Servokreis Lose und Hysterese ausgeschaltet sind. Letztere werden noch vom Lageregelkreis erfaßt.

Mit Hilfe von Lageregelkreisen wird der Stellbereich des Antriebs gegenüber nur geschwindigkeitsgeregelter Ausführung erweitert, indem auch bei sehr kleinen Vorschüben die Abweichung von der Sollgeschwindigkeit zu einem anwachsenden Lagefehler und zur Beschleunigung führt, wodurch niedrigste Vorschübe einstellbar sind.

Der Fehler der Wegregelung bei ordnungsgemäßer Dimensionierung setzt sich aus drei Komponenten zusammen [6.45]:

- dynamische Regelabweichung an der Meßstelle
- Übertragungsfehler Meßstelle zur Bearbeitungsstelle
- Fehler durch Verlagerung der Spindel.

Diese von der Zeit abhängigen Größen bestehen aus einem Gemisch abhängiger Schwingungen und aperiodischer Vorgänge.

In [3.2] [6.46] werden für Lageregelkreise angegeben:

maximale Änderung des Geschwindigkeitssollwertes $\Delta \dot{s} = (0{,}3 \cdots 0{,}5)\ \dot{s}_{max}$

Motorbeschleunigung $\varepsilon_{Mot} = (0{,}7 \cdots 0{,}85)\ \varepsilon_{0\,Mot}$

Drehzahlreserve $\omega_{Mot\,max} = (0{,}5 \cdots 0{,}8)\ \omega_{0\,Mot}$

$\omega_{Mot\,min} = 0{,}4 \cdots 0{,}8\ [1/s]$,

wobei zusätzlich $\omega_{Mot\,max} = S\ \omega_{Mot\,min}$ einzuhalten ist.

Zur Vertiefung wird als Zusatzliteratur empfohlen [6.39] [6.47] [6.48].

6.3. Starkstromteil

Im Starkstromteil des VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt erfolgt die Verstärkung der von der Anpassung kommenden Signale mit Relais (Relog 2 RH 01) und Weitergabe an Schützschaltungen, wobei noch gewisse Verriegelungen verwirklicht werden (Stern-Dreieck-Schaltung, Rechts-Linkslauf u. ä.).

Anpassungs- und Starkstromteil sind konstruktiv in einem oder mehreren Schränken EGS 1800 × 1000 × 800 (600) mit Schwenkrahmen vereinigt, der maximal 10 Kassetten aufnimmt. Bei kontaktloser Ausführung der Anpassung werden diese Kartenbaugruppen zunehmend in den NC-Schrank integriert.

Die Schütze sind auf einem Montagerahmen mit Montageblechen befestigt. Die Leistungselektronik hat sich außer bei Antrieben noch nicht in breitem Rahmen eingeführt.

Die Verbindungen NC zur Anpassung und zur Verarbeitungsmaschine sind steckbar über Kabel gestaltet, nur große Leistungskabel werden geklemmt.

Weitere Ausführung zur Starkstromtechnik übersteigt den Rahmen dieser Arbeit.

7. KONSTRUKTION, TECHNOLOGIE

7.1. Stromversorgung

Die baukastenförmige Stromversorgung für das System NC 400 [7.1] [7.2] besteht aus (Bild 7.1)

- der Rohstromversorgung mit Transformator, Sicherung, Glättung und Gleichrichtung sowie
- den Stabilisierungsbausteinen.

Die Baugruppe Rohstromversorgung wird an den Leistungsbedarf der NC-Variante angepaßt. Die relativ geringe Leistung wird wegen der Ökonomie der Gleichrichtung nur einphasig entnommen und entsprechend geglättet. Die Glättungskondensatoren *C2* müssen ohnehin einen so großen Wert erhalten, daß kurzzeitige Spannungseinbrüche bis 5 ms gestützt werden.

Wegen des unbelastbaren Nulleiters z. B. in der UdSSR wird künftig auch 380-V-Ds- bzw. Zweiphasenanschluß vorzusehen sein.

Externe HF-Störungen werden primärseitig durch Elektrolytkondensatoren (*C1* = 0,1 μF) gefiltert bzw. durch einen geerdeten Schirm als kapazitiv übertragene Störungen unterdrückt.

Die wirtschaftlichste Methode besteht darin, die diversen Wechselspannungen einem Spezialtransformator mit mehreren (7) Sekundärwicklungen zu entnehmen.

Tafel 7.1 zeigt die Parameter der NC-Stromversorgung; die NC 410 und NC 430 erhalten eine Sonderkonstruktion wegen des Platz- und Strombedarfs.

Die Stabilisierungsbausteine sind nach Bild 4.28 mit Serienregelung ausgeführt. Der Vergleich erfolgt im integrierten Differenzverstärker, der ein Signal an den Leistungstransistor bzw. eine Darlingtonstufe *T1* (bei 12 A drei Transistoren KU 606 parallel) abgibt, wodurch *T1* pulsend leitend wird.

Die Frequenzkompensation überlagert eventuelle Schwingungen der Ausgangsspannung, die am Widerstand *R4* einstellbar ist. Bei schwimmender Anordnung zur Regelung höherer Spannungen bis 250 V ist eine Zenerdiode mit U_Z an den Emitter des integrierten Leistungstransistors zu geben. An *R3* erfolgt die Stromüberwachung.

Die Einstellung der Logikspannung gestattet die Kompensation konstanter Spannungsabfälle nach dem Stabilisator durch

Kontaktübergänge

Leiterzüge auf Kartenbaugruppen

Stromschienen

Zuleitungen (in der Kassette 4 mm² Cu).

Am integrierten Schaltkreis wird eine Spannungstoleranz von ± 5% gefordert, so daß hierfür neben der 2%-Toleranz der Stabilisierung noch 3% zur Verfügung stehen.

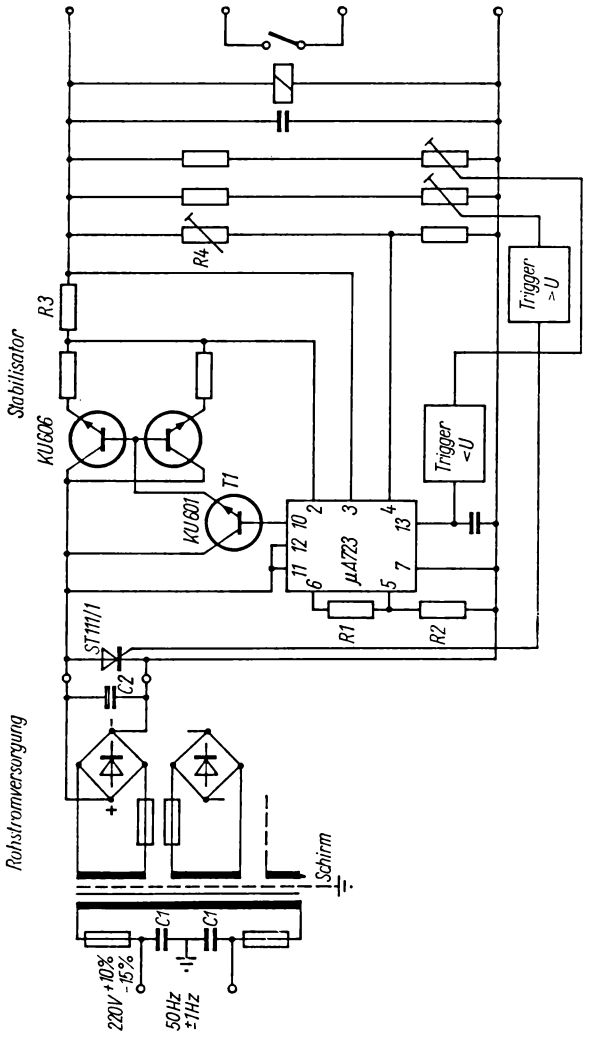


Bild 7.1. Stromversorgung NC 400. Rohstromversorgung und Stabilisierung

Die Stabilisatoren sind nicht parallel schaltbar, sie werden unmittelbar am Verbraucher (außer bei externen Verbrauchern) angeordnet.

Der Lampenstabilisator überwacht auch den Lampenstrom. Fehlt dieser und somit der Spannungsabfall über einen Widerstand (< 150 mA), wird signalisiert. Die Lampenströme werden einzeln eingestellt, weil die Kabellängen zum Geber unterschiedlich sind.

Tafel 7.1. Stromversorgung

Stabilisierte Spannung V		Toleranz %	Einstellbereich der Spannung V	Stromstärke A	Rohspannung V	Überstrom $I>$ A	Unterspannung $U<$ V	Überspannung $U>$ V	Stabilisatorbausteingröße mm × mm
Logikspannung	+ 5	± 2	4,7 ... 5,5	6/12	11	6 u. 12,2	4,8	5,5	215 × 170
	+ 5	± 2	4,7 ... 5,5	2 × 1	11	1,4	—	5,5	95 × 170
DA-Wandler	+ 15	± 0,5	14,5 ... 15,6	1	24	1,4	—	| ± 18 |	95 × 170
Komparatorspannung für Meßeingang	+ 12	± 2	11,6 ... 12,8	1	24	1,4	—	14	95 × 170
	— 6	± 2	5,6 ... 6,5	1				| — 7 |	
Meßsystemlampenspannung	+ 10	± 2	9,8 ... 10,6	7,5	18	4,0 ... 7,6	ja	—	215 × 170
Zeichen- und Ziffernanzeige	—	—	—	0,11	300	Feinsicherung	—	—	—
Leser	—	—	—	0,7	50	Feinsicherung	ja	—	mit Pufferkondensator
Relais	—	—	—	1,5	24	Feinsicherung	—	—	—

Geglättet, aber unstabilisiert bleiben die Spannung für die Ziffern- und Zeichenanzeigeröhren (300 V, solange keine Lumineszenzdioden eine direkte Ansteuerung mit Logikspannung gestatten), die Spannung für den Leser (50 V), Relais und Anzeigelampen (24 V). Der Leser Typ 305 verlangt einen Stromanstieg von $di/dt = 150$ mA/ms für 3 bis 4 ms; die Spannung muß dazu durch einen Kondensator gepuffert werden.

Die Unterspannungskontrolle sperrt im Spannungsregler den Ausgang (Abschaltcharakteristik). Nullspannungskontrolle mit Relais ist bei ± 15, $+21$, -6 und 50 V vorgesehen.

In den analogen Kreisen mit ± 15, $+12$ und -6 V wird eine Strombegrenzung erforderlich, während 24, 50 und 300 V Schmelzsicherungen erhalten. Das Ansprechen der Sicherung wird angezeigt.

Überspannung wirkt auf einen Thyristor-Kurzschließer, um die sehr spannungsempfindlichen IC zu schützen. Dieser übernimmt bis zum Abschmelzen der Sicherung die volle Leistung und wird sinnvollerweise eingangsseitig angeordnet.

7.2. Konstruktiver Aufbau

Numerische Steuerungen sind Datenverarbeitungsanlagen im Einsatz unter Werkstattbedingungen. Sie vereinen in sich ästhetische Prinzipien und Elemente der Bürotechnik mit den rauhen Forderungen der metallverarbeitenden Industrie.

Das Gehäuse einer NC mit seinen Einbauten muß folgende Aufgaben erfüllen:

- Aufnahme und mechanischer Schutz der elektrotechnischen Einbauelemente und Baugruppen
- Schutz vor Eindringen von Wasser und Fremdkörpern, wie Nebel (z. B. Kühlmittel), Stäube (Guß, Schmirgel u. ä.)
- Schutz des empfindlichen Lochstreifens und des Lesers im Betriebszustand
- Abfuhr der entstehenden Verlustwärme
- Anordnung der Bedien-, Kontroll- und Anzeigeelemente in übersichtlicher und leicht zu handhabender Form
- Schutz vor unberechtigter Handhabung
- Erfüllung der Anforderungen an die Formgestaltung
- Schutz vor zufälligem und vorsätzlichem Berühren spannungführender Teile
- Abschirmung gegen Störfelder (Faradayscher Käfig)
- Zugänglichkeit von Meßpunkten im Service
- Schaffung der Voraussetzungen für eine gute Verdrahtungstechnologie.

Wie im internationalen Maßstab üblich, wird auch das System NC 400 in Schrankbauform angeboten. Grundlage bildet das Einheitliche Gefäßsystem (EGS) (TGL 25060, TGL 25061 und TGL 25064), von dem die Schrankhauptabmessungen (TGL 25080) und die Baugruppenträger (TGL 25071) zur Aufnahme der Kartenbaugruppen (TGL 25065) festgelegt sind.

Die Schränke ($h \times b \times t = 1600$ mm $\times$ 800 mm $\times$ 600 mm) sind zur Aufnahme eines schwenkbaren und eines festen Rahmens geeignet.

Der in Profilbauweise montierte Schrank entspricht mit vorder- und rückseitiger einflügeliger Tür einem Schutzgrad IP 43 nach TGL 15 165/01. Danach sind Fremdkörper von $\leqq 1$ mm (Ziffer 4) zur Ablagerung an unkritischen Stellen zulässig. Der Wasserschutz (Ziffer 3) gilt mit Ausnahme der Bedienseite, die nur

IP 40 aufweist. Der Schutzgrad wird mit Zwangsbelüftung auf IP 53/50 durch einen Überdruck von etwa 0,1 mbar erhöht.

Die Montagerahmen aus Stahl-Leichtprofil tragen die 480 mm breiten Kassetten, die bei einem Rasterabstand von 20 mm bis zu 23 Kartenbaugruppen aufnehmen. Sie werden für 95 oder 215 mm hohe Kartenbaugruppen bei einer einheitlichen Tiefe von 170 mm ausgeführt. Die Kartenbaugruppe wird durch Plastschienen geführt. Die direkten Steckverbinder nach TGL 25 177 werden in 26-, 58- und 90poliger Ausführung angeboten:

Nennstrom	$\leqq 3$ A
Schaltstrom	$\leqq 0{,}5$ A
Schaltspannung	$\leqq 60$ V
Schaltleistung	$\leqq 15$ W bzw. 20 VA
Kontaktwiderstand bei PdAu-Ausführung	20 mΩ
Steckkraft	< 70 N
Lebensdauer	500 Steckungen.

Die Vordertür des Schranks wird für die spezifischen Belange der Numerik gestaltet (Bild 7.2).

Aus arbeitsschutztechnischen Gründen bleiben die Handeingabeschalter, Start- und Stopptaster, Anzeigelampen frei zugänglich. Beim Automatikbetrieb wird

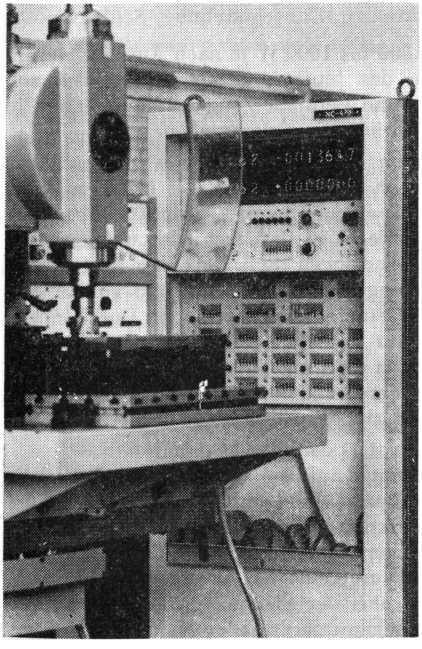


Bild 7.2. Schaltschrank NC 470 an der Werkzeugmaschine FUW 315
Werkfoto VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt

der Leser nach Einlegen des Lochstreifens durch eine Plexiglasscheibe mit Magnethalter abgedeckt. Der Lochstreifen kann bis zu einer Länge von 15 m in einer Bandkassette aufbewahrt werden. Bandwickelvorrichtungen gehören heute international zum Stand der Technik und werden wie die Leser für Fronttafeleinbau angeboten. Die mit der Lochstreifeneingabe verknüpften Anzeigen werden zweckmäßig direkt neben dem Leser angeordnet.

Über dem Leser ist die Bedienblende angeordnet. Auf ihr spiegeln sich die maschinenabhängigen Besonderheiten wider. Es ist deshalb notwendig, die Anzahl der Geräte projektieren zu können. Sowohl die Anzahl der zu einer Gruppe von Eingabeschaltern gehörenden Vorwahlschalter (je nach Dezimalenzahl) als auch die Zahl der Schaltergruppen selbst (z. B. auf Grund der Werkzeugzahl) sind variabel.

Zur Kennzeichnung des Geräts bzw. Signals werden textlose Sinnbilder nach TGL 28–87 (angelehnt an ISO-Empfehlung 481) durch Siebdruck auf die Blende aufgebracht. Die Farben für Taster/Leuchtmelder sind wie folgt festgelegt:

Rot: „Aus"/anomaler Zustand, Eingriff nötig

Gelb: Start zur Vermeidung gefährlicher Bedingungen für nicht übliche Rückbewegungen/Warnung oder Hinweis, Wert → Grenzwert

Grün: Start (Vorbereitung), „Ein" Steuerstromkreis, Hilfsmotoren/betriebsbereit

Schwarz: Start (Ausführung) einschließlich Tippen

Weiß: Alle anderen Befehle (Beleuchtung, Rückstellung, Schutzrelais)/Stromkreis unter Spannung

Blau: Leuchtmelder für andere Funktionen, Einrichtstellung, Schleichgang.

Zum Abführen der Verlustwärme von 500 bis 1000 W je nach Ausbaustufe ist eine Zwangsbelüftung nötig. Messungen des inneren Temperaturgefälles zur Bestätigung ausreichender Wäremabfuhr sind Voraussetzung der Zuverlässigkeit des Erzeugnisses, eventuell sind Luftleiteinrichtungen vorzusehen.

Die Zwangsbelüftung wird beim System NC 400 durch einen im separaten Untersatz angeordneten Axiallüfter erreicht. Die über ein Filter (textiler Vlies, Wufilon FM 500) angesaugte Luft wird mit einem Überdruck von 0,1 mbar eingebracht und entweicht durch das Dachblech, so daß trotz der notwendigen Öffnung kein Wasser in das Schrankinnere eindringen kann. Bei dieser Ausführung unterliegt das Filter der Wartung. Wartung freie Ausführung und völlige Abdichtung erhält man mit einer Zweikreis-Wärmetauscheranordnung. Durch innere Umwälzung streicht die erwärmte Luft am Tauscher (Rückseite, Seitenwand) vorbei, der an der Außenseite die Energie an die Umgebungsluft abgibt. Vorteilhaft ist auch hierbei Zwangsbewegung der Außenluft, allerdings jetzt ohne Filterung, es sind auch geschwärzte Kühlrippenausführungen über die ganze Fläche bekannt.

Die Verdrahtung innerhalb der Kassetten und auf dem Rahmen wird in Wickeltechnik [5.1] mit Y-Schaltleitung 1 × 0,3 ausgeführt (Bild 7.3). Bei 3 bis 4 Windungen mit 12 bis 16 Preßverbindungen an den Kanten der Wickelstifte ist die elektrische und mechanische Verbindung einem Lötanschluß absolut gleichwertig, und die gefürchteten kalten Lötstellen sind ausgeschlossen. Die Länge der Wickelstifte gestattet, 3 Wickel aufzubringen, wobei der Stift an gleicher Stelle nur zweimal verwendbar ist. Die Verdrahtung kann als X- oder Kanalverdrahtung

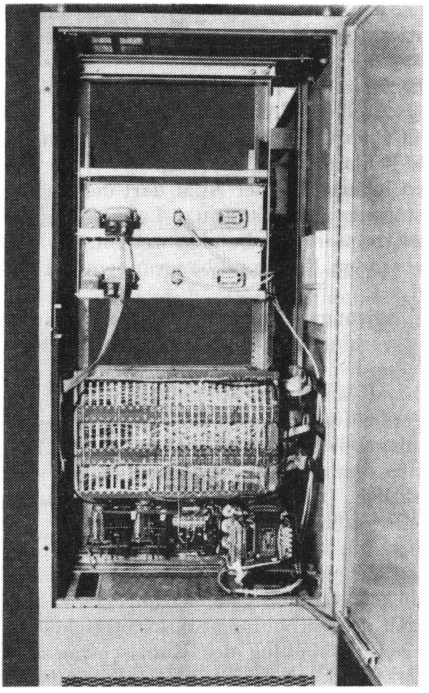


Bild 7.3. Wickelverdrahtung
Werkfoto VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt

ausgeführt werden, erstere vermeidet Parallelführung von Leitungen, vermindert aber die Zugänglichkeit.

Zur rationellen fehlerfreien Verdrahtung dient ein lochstreifengesteuerter Verdrahtungshalbautomat, der gleichzeitig die Prüfung der ausgeführten Verbindungen auf Durchgang und Schluß zu anderen Wickelanschlüssen des Steckverbinders am Ende der Verdrahtungsarbeiten ermöglicht. Die handgeführte Wickelpistole wird auf einen angezeigten Koordinatenpunkt positioniert, der Wickelvorgang nochmals mit dem Ansatz am richtigen Wickelstift verriegelt, wozu alle Steckverbinder zu adaptieren sind. Der Draht wird abgelängt und entisoliert zugeführt.

Zum Anschluß der Geräte an der Blende wird Bandleitung BY 38 × 0,3 (KWO-S 459.11) verwendet. Zur Abschirmung liegt jede zweite Ader an Masse, die elektrische Verbindung erfolgt durch Stecken.

Im Zeitalter der elektronischen Datenverarbeitung werden die Fertigungsunterlagen EDV-gerecht aufbereitet und die Daten für Projektierung, Materialdisposition, Fertigungsplanung, technologische Vorbereitung und Verdrahtung mittels EDVA erstellt. Voraussetzung dazu ist ein umfassender Projektierungsalgorithmus, mit dessen Hilfe die Kundenwünsche für das als Baukasten gestaltete System realisiert werden.

Auch in der Entwicklungsphase dienen heute die Ergebnisse wissenschaftlicher Arbeiten (Autevo) zur Unterstützung geistiger Routineprozesse, wie zur Anord-

nung der Bauelemente auf Leiterplatten, zur Trassierung auf Leiterplatten, zur Prüfung und Fehlerortung, zur Simulation logischer Entwürfe zwecks Optimierung u. ä.

Unter Verwendung von Programmablaufplänen (PAP) läßt sich die Funktion eindeutig ohne umschweifenden Text beschreiben (SAK-N 125). Sie stellen nach [7.3] das Optimum als tragendes Element einer Gesamtbeschreibung dar und sind gleichzeitig Hilfsmittel für die rationelle Fehlerortung [7.4] [7.5].

Zur Vermeidung von Störspannungen innerhalb einer NCM darf der Schutzleiter als Bezugspotential selbst nicht störungsverseucht sein, 5-Leiter-Netz, und soll mit dem Gehäuse mindestens wechselstromseitig verbunden werden, wodurch die unvermeidbaren Kapazitäten zwischen den Elektronikbaugruppen und dem Schrank HF-seitig kurzgeschlossen sind.

Als Grundregel gilt: Man vermeide Störungen am Entstehungsort (hierzu ausführliche Angaben in [7.6] [7.7]) bzw. verhindere Ausbreitung (Schirmung).

Der Schutzleiter wird sternförmig von der speisenden Stelle – meist dem Starkstromschrank, in dem er nur einmal (keine Schleifenbildung!) mit dem Schutzleiter des speisenden Netzes zur Vermeidung zu hoher Berührungsspannung im Fehlerfall verbunden ist – an alle Anlageteile geführt. Der günstigste Verbindungspunkt ist eventuell experimentell zu ermitteln. Gegebenenfalls müssen zusätzliche Verbindungen unterbrochen werden. Diese Leitung muß impedanzarm und niederohmig sein und dient als Rückschlußleitung für Störströme.

Sternerdung bewirkt, daß der Störspannungsabfall die NC-Eingänge mit Filtern bzw. galvanischer Trennung beaufschlagt und weniger die Meßeingänge mit direkter Kopplung. Man vermeide tunlichst, die Meßsystemleitungen mit Störstrom zu beaufschlagen, was beim Fehlen der Verbindung Starkstromschrank – Werkzeugmaschine und bei beiderseitiger Verbindung des Kabelschirmes mit dem Schutzleiter eintritt. Wird die Elektronik eines zweiten Anlageteils nur durch einen mit Kabel mitgeführten Bezugsleiter verbunden, kann das Bezugspotential durch den Störstrom unzulässig angehoben werden.

Geschirmte Kabel schützen gegen äußere Störfelder, wobei die Wirkung mit der Länge abnimmt. Sie sollen einseitig mit Bezugspotential verbunden sein, da beiderseitiger Anschluß zu Spannungsabfällen durch Ausgleichströme infolge Schleifenbildung führt.

Bei verdrillten Leitungen ist der HF-Störschutz am größten. Hin- und Rückleitungen sollen zu einem Paar vereinigt sein, und zwar auch dann, wenn ein gemeinsames Rückleitungspotential vorhanden ist. Das Mitführen des Bezugspotentials bei jeder Signalleitung wird bei Bandkabel angewendet.

Allgemeingültig sind folgende Regeln:

- kurze Kabel und Leitungen anstreben
- Hin- und Rückleiter möglichst nahe beieinander anordnen wegen kleiner umfaßter Fläche
- Signal- und Leistungskabel auf Abstand legen, eventuell schirmen.

Durch die Vielfalt der stochastisch auftretenden, meßtechnisch und theoretisch im voraus nicht zu bestimmenden Störgrößen ist es kaum vermeidbar, in Sonderfällen experimentell notwendige Maßnahmen zu ermitteln. Eingabe- und Ausgabeschaltungen zur Unterbindung direkter Störungen sind unumgänglich.

8. PRÜFUNG, INBETRIEBNAHME, SERVICE, ZUVERLÄSSIGKEIT

8.1. Prüfung, Fehlerortung

In einen rationellen Fertigungsablauf werden Zwischen- und Endkontrollen eingebaut. Zwischenkontrollen erlauben günstige Lokalisierung von Fehlern in kleinen Fertigungseinheiten. Daraus folgen nachstehende Prüfabschnitte [8.1]:

- Eingangsprüfung der Zulieferteile, wie Bauelemente, Halbzeuge, Baugruppen
- Prüfung von Funktionsgruppen, wie Kartenbaugruppen, Netzteile, Bedienblende Antriebssteller, AC-Baugruppen usw.
- Prüfung der Rahmenverdrahtung
- Endprüfung, Dauertest.

Alle Prüfarbeitsgänge sollen

- weitgehend frei von subjektiven Einflüssen sein
- Ermüdung durch Gleichförmigkeit vermeiden
- klar und übersichtlich sein
- bei größeren Stückzahlen automatisch ablaufen
- den endgültigen Einsatzbedingungen nahekommen
- leichte Adaptierbarkeit des Prüflings gestatten
- statistische Auswertung und Protokollierungen zulassen
- auf Grenzwerte mit Gut-Schlecht-Aussage erfolgen
- bei Raumtemperatur durchgeführt werden können
- einmalig, beim Dauertest zeitraffend sein.

Jeder Bezieher von Kaufteilen erwartet von diesen eine hohe Qualität. Statistische Stichproben in der Wareneingangskontrolle setzen eine technologisch gesicherte vorgelagerte Fertigungsphase und eine die Eigenschaften nicht verändernde Transporttechnologie voraus. Ein schneller Materialumschlag und eine einwandfreie Lagerung verringern die zeit- und umweltabhängigen Parameterveränderungen.

Meist sind höhere Forderungen als die normale Fehlerrate der Bauelemente mit hohem Preiszuschlag verbunden, da künstliche Alterung nötig wird. Je einfacher und automatisierter die Fehlerlokalisierung und -beseitigung nach dem ersten eigenen Fertigungsabschnitt ist, um so unkritischer sind Bauelementefehler. Jedoch stellt ein Wechseln von Bauelementen auf Kartenbaugruppen einen höchst unerwünschten Eingriff dar, der selbst die Gefahr weiterer Fehler in sich birgt (Handlötung, Verletzen von Leiterzügen, mechanische und thermische Beanspruchung beim Auslöten).

Ein Konstruktionsprinzip ist, Kaufteile nur in den vom Hersteller angebotenen Toleranzgrenzen ohne Aussuchbedingungen und bei großen Stückzahlen entsprechend dem statistischen Anfall der Parameter (z. B. Verstärkungsfaktoren)

einzusetzen. Aussuchen ist teuer und für den Käufer des ausgesonderten Rests eventuell problematisch, wenn mit einer normalverteilten Gruppierung der Charge um den statistischen Mittelwert gerechnet wurde.

Die Prüfung diskreter Bauelemente erfolgt mit den bekannten Verfahren [8.2].

Digitale integrierte Schaltkreise werden statisch mit verschärften Parametern zum Erkennen von Temperatureinflüssen in vom Hersteller angegebenen Schaltungen geprüft. Ihre große Anzahl erfordert automatische Zuführung, Kontaktierung und Aussonderung. Die vorgeschriebenen Prüfbedingungen werden über Lochstreifen den entsprechenden Anschlüssen zugeordnet. Der Soll-Ist-Vergleich erfolgt durch Spannungsvergleich. Dynamische Prüfung erfolgt im Bedarfsfall als Stichprobe von Hand mit handelsüblichen Oszillografen.

Alle Leiterplatten müssen einer Sichtkontrolle unterworfen werden, wobei jedoch Durchkontaktierungsfehler nicht mit Sicherheit erfaßt werden. Die beim Konturenschnitt entfernten Kontrollöcher gaben beim Leiterplattenhersteller Aufschluß über die Güte der Durchkontaktierung.

Die Kartenbaugruppenprüfung [8.3] soll kalte Lötstellen, Lötbrücken, Fehlbestückungen, Unterbrechungen der Leiterzüge und defekte Bauelemente ausweisen. Intermittierende Kontaktfehler können allerdings nicht mit Sicherheit geortet werden.

Die meisten Fehler sind logisch durch Veränderung des funktionellen Vermögens erfaßbar. Dagegen ist das wegen thermischer Zerstörung verbotene Zusammenschalten von Gatterausgängen durch Kurzschluß logisch nicht erkennbar (Bild 8.1). Es dominiert weiter das 0-Signal (G3/3 = L), der Strom durch *T1* und *T2* entspricht dem Kurzschluß wie bei Spikesbildung und führt nach undefinierter Zeit zur Zerstörung. Ebenfalls sind offene, logisch nicht benötigte Eingänge nicht erkennbar. Diese führen zwar nicht zur Zerstörung, sind aber wegen Störimpulse unzulässig. Fehler in Rückführschaltungen und bei Mehrfachverknüpfungen des Ausgangs sind logisch erkennbar, jedoch nicht näher zu lokalisieren. Funktionsbedingte Rückführungen werden daher über die Steckverbinder geführt (außer RS-FF).

Sind Speicherschaltungen (sequentielle Schaltungen) enthalten, müssen diese zuerst durch eine geringe Anzahl Prüfschritte auf eine definierte Ausgangsstellung gebracht werden.

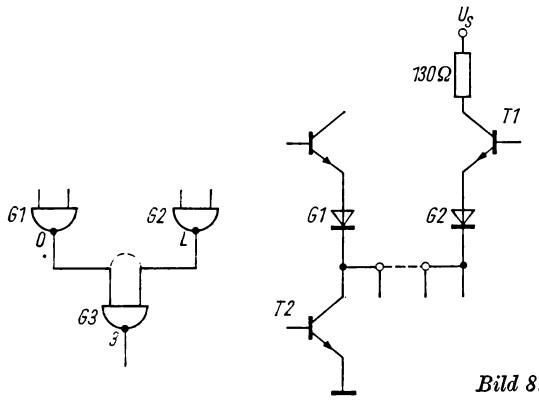


Bild 8.1. Kurzschluß der Ausgänge

Ausgänge von Generatoren und monostabilen Kippstufen müssen zwecks Fremdtaktung vom Steckverbinder her blockierbar sein.

Die Prüfung wird als statischer Vergleich der erwarteten mit den tatsächlichen Ausgangssignalen bei bestimmten Eingangskombinationen durchgeführt. Dazu kann man die Eingangsvariablen in allen möglichen Kombinationen vorgeben und erhält die Maximalzahl der Prüfschritte, oder man leitet aus der Kenntnis der logischen Funktion eine minimale Anzahl Eingangskombinationen ab. Für eine Kartenbaugruppe ergeben sich 100 bis 200, maximal 2000 Prüfschritte.

Das Prüfgerät für digitale Kartenbaugruppen enthält als programmierbare Vergleichs- und Speichereinrichtung (Bild 8.2) einen Prozeßrechner.

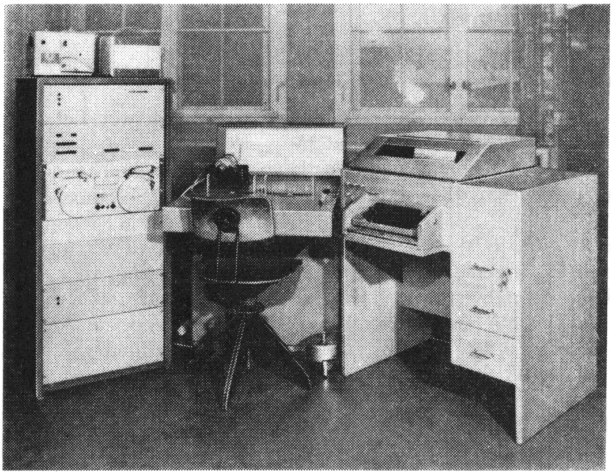


Bild 8.2. KBG-Prüfgerät
Werkfoto VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt

Da die Eingangs- und Ausgangsanschlüsse mit dem Kartenbaugruppentyp variieren, wird zur Vereinfachung schaltungstechnisch nicht zwischen beiden unterschieden. Alle Ausgangsanschlüsse werden mit L-Signal beaufschlagt, das erhalten bleibt, wenn auch der Prüfling L ausgibt. 0-Signal zieht das Potential auf 0. Der dadurch eintretende Kurzschluß, wie Bild 8.1, wird durch einen Leistungstransistor abgefangen. Die Anschluß-(Pin-)Belegung des Kammes wird oktal $(01)_8$ bis $(35)_8$ dem Rechner eingegeben, Flanken werden in statische Teilabschnitte zerlegt (z. B. $0 \rightarrow L \rightarrow 0$ für einen Impuls).

Der Prüflochstreifen entsteht mit Hilfe des Programms zum Testen digitaler Kartenbaugruppen (DIKATEST) [8.1].

Die technologische Anweisung enthält die Prüfschrittabelle, die über den Zustand jedes Anschlusses bzw. Speichers im jeweiligen Schritt Auskunft gibt. Bei maschinellem Entwurf der Kartenbaugruppe kann diese Tabelle ebenfalls mit entstehen. Das Abspeichern einer vollständigen Prüfschrittabelle erfordert 4 bis 8 k 12-bit-Wörter Speicherkapazität. Siehe auch [8.4].

Da die Prüfung nur „gut – schlecht" unter Angabe des fehlerhaften Prüfschrittes entscheidet, ist die Fehlerortung [8.5] [8.6] die schwierigere Aufgabe. Bei ihr wird statische und dynamische Signaltestung erforderlich, wobei ohne zerstörenden Eingriff nicht alle Fehler zu orten sind.

Ein mögliches Verfahren ist die Fehlerortung mit körperlichem Vergleichsnormal, das wie der Prüfling eingespeist wird. Gleichartige Meßpunkte werden manuell abgetastet oder die Schaltkreise werden adaptiert und die Signale verglichen.

Ohne Vergleichsnormal erfolgt die Fehlersuche intuitiv zeitaufwendig von hochqualifiziertem Personal nach dem Stromlaufplan bzw. anderen Schaltungsunterlagen. Von *Habiger* und *Heß* [7.4] wurde nachgewiesen, daß sich Programmablaufpläne für die Funktionsbeschreibung gut zur Fehlerortung eignen. Das Diagnoseverfahren kann kombinatorisch

(Fehler = { in fehlerhaften Zweigen liegende Elemente } \
\ { in fehlerfreien Zweigen liegende Elemente })

oder sequentiell sein, bei der die Anweisung n vom Schritt $n-1$ abhängt. Letztere entspricht der üblichen Arbeitsweise des Prüfenden.

Bei einer rechnergestützten Methode wird das körperliche Vergleichsnormal durch in den Rechner eingespeiste Signalkombinationen ersetzt (Software-Normal).

Beim Verfahren von *Ermilov* [8.7] beschränkt man sich auf logisch erkennbare Einfachfehler und ermittelt sogenannte Fehlerpfade durch Angabe aller Leitungsnummern und deren Signalzustände. Dem Kleinrechner muß dazu die in einer großen EDVA mit erheblichem Aufwand errechnete Fehlerortungsdokumentation eingegeben werden [7.6]. In [8.8] wird die Fehlerverteilung wie folgt angegeben: 47% Lötfehler, 33% Bauelementefehler, 11% Bestückungsfehler, 9% sonstige Fehler.

Netzteile sind auf Einhaltung der Spannungstoleranz zwischen Leerlauf und Last und bei Wechselspannungsschwankungen sowie auf Kurzschlußfestigkeit zu überprüfen.

Die Prüfung der Rahmenverdrahtung erfolgt auf der maschinellen Verdrahtungseinrichtung (s. Abschn. 7.2.) [7.3] [8.9].

Die Bedienteilprüfung [8.10] stellt erhebliche Anforderungen an die Flexibilität des Prüfgeräts, die Adaption ist nur einseitig möglich, da sich am Leitungsende Bedien- bzw. Anzeigeelemente befinden. Daher ist nur eine kombinierte Verdrahtungs- und Funktionsprüfung möglich.

Umfassend ist die Endprüfung zu gestalten. Der Prüfling selbst soll aktiv in die Prüfung mit funktionsfähigen Teilen (z. B. Eingabe) einbezogen werden.

Als Prüfgerät hat sich das für den Service entwickelte Komplexservicegerät [8.11] [8.12] bewährt (Bild 8.3), bei dem Eingabe- und Anzeigefunktionen sowie Simulation des Anpaßteils und der Meßwertgeber ermöglicht sind. Das Gerät gestattet

- Betreiben der NC ohne Anpassung, Starkstromteil, Antriebe, Meßwertgeber durch deren Simulation
- Überprüfung der Eingangsinformation in den DA-Wandler
- optische Anzeige von digitalen Ausgangssignalen aus der NC
- Überprüfung analoger Ausgangsspannungen aus der NC
- Prüfung der Meßwertsysteme WMS 10^6 spv und IGR 1000 mit Nullimpuls

- Anzeige des Istwertes
- Kontrolle der Signallänge der M-Befehle
- Simulation aller Vorschubgeschwindigkeiten (R 20) durch Frequenzausgabe zur Durchführung von Positioniervorgängen bei Punkt-Strecken-Steuerung
- Erzeugung des Grundtaktes und manuelle Einstellung einer definierten Anzahl von Impulsen.

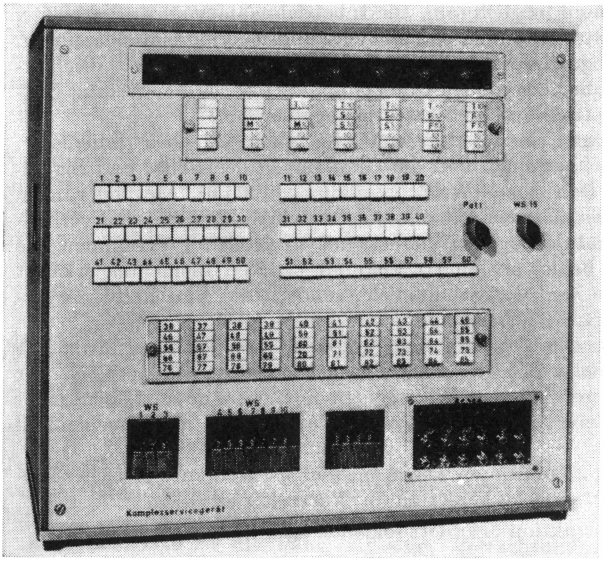


Bild 8.3.
Komplexservicegerät
Werkfoto VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt

Das Gerät gestattet geschlossenen Programmablauf bei Punkt-Strecken-Steuerungen (Dauertest), da es alle von der NC von außen erwarteten Signale einschließlich Meßeingänge liefert. Mit einem Dauertest unter verschärften Bedingungen kann man die Frühausfallphase der Bauelemente in die Werkstatt legen. Die visuelle Überprüfung der richtigen Arbeitsweise erfordert den Menschen, im Dauertest genügt eine zyklische Kontrolle.

Das rationelle Prüfgerät für Bahnsteuerungen ist ein Zeichentisch, mit dem die Dynamik der Regelung (allerdings mit einem fremden Stellglied und einer fremden Regelstrecke) überprüft wird (Bild 8.4).

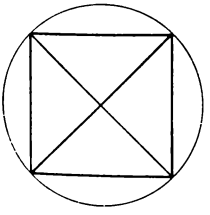


Bild 8.4. Prüffigur für Bahnsteuerungen

Als Prüf- und Fehlerortungshilfe stehen Lampen- und Prüfadapter zur Verfügung, mit deren Hilfe Signalzustände leicht feststellbar sind. Im eingelöteten Zustand lassen sich mittels Einimpuls-Hochstromgenerators und Testers Fehler an IC ermitteln [8.13].

8.2. Inbetriebnahme, Wartung, Service

Die maschinentechnische Inbetriebnahme muß handbedient ohne NC nur mit Anpaß- und Starkstromteil möglich sein. Die Inbetriebnahmevorschrift (SAK-N 122) schreibt für den Starkstrom-Anpaßteil Zeit- und Thermorelaiseinstellung, Kontrollen der Spannung, Drehrichtung, Drehzahl, Verriegelungen, Vorabschaltwerte, Zwischenvorschübe, Überläufe, Unterprogramme, Positionierzeiten, Notabschaltung bei Handbetrieb und Meßsystemjustage vor.

Numerische Steuerungen sind wartungsarm. Lediglich der Lochstreifenleser, die Filter in den Lüfterbausteinen und die Glühlampen der Geber und Signalleuchten bedürfen der Betreuung (Wartungszyklus $\geqq$ 1000 h). Abwanderungen von Parametern, die nach längerer Zeit zum Ausfall führen könnten, sind vorbeugend kaum erfaßbar [8.14]. Dagegen können mit sinnvollen Programmen alle Bauteile aktiviert und Fehler an längere Zeit unbenutzten Elementen erkannt werden; denn nicht die Zahl der Schaltspiele, sondern die Einschaltdauer bestimmt in der Elektronik die Lebensdauer.

Für die Genauigkeit der Positionierung empfiehlt sich eine turnusmäßige Kontrolle der Vorabschaltwerte, die nach der mechanischen Einlaufphase der NCM zum Überlauf führen können. Die wenigen Elemente, deren Lebensdauer kleiner als die Gesamtlebensdauer des Erzeugnisses ist, sind als Verschleißteil zyklisch zu wechseln.

Kundendienstleistungen stellen vor allem ein technisch-organisatorisches Problem dar; denn die NCM darf im Fehlerfall nur kurzzeitig ausfallen.

Servicegerechte Konstruktion erfordert folgende Qualitätsmerkmale [7.3]:

- Funktionstüchtigkeit, hohe Zuverlässigkeit
- leichte Zugänglichkeit und Bedienbarkeit
- wartungsfreie bzw. -arme Ausführung, gute Wartbarkeit
- gute Reparierbarkeit (möglichst steckbares Auswechseln)
- Anbringen von Prüfpunkten
- Einschränkung im Elemente- und Baugruppensortiment.

Durch Schulung der Anwender zum Eigenservice kann die Verfügbarkeit der Ausrüstungen wesentlich erhöht werden.

Neben dem Komplexservicegerät, Adaptern, Serviceziffernanzeigen und IC-Pulser mit IC-Tester stehen spezielle Service-Kartenbaugruppen zur Verfügung, die für Bahnsteuerungen

> Nullen; Einzeltaktgabe sowie die Anzeigen Einzeltakt; Dauertakt; externer/interner Takt; Umlauf Korrekturrechner; Umlauf Interpolator; Blockade Nachlauffehler; Leser Einzelschritt; ETZ, Fehler

und für Punkt-Strecken-Steuerung NC 470 die Anzeigen

> 2^0 bis 2^3, 10^0 bis 10^7; *F, FT, K1, K2, S, K3, I, V*; Korrektur *K6*, falsches Ergebnis

gestatten.

8.3. Zuverlässigkeit

8.3.1. Allgemeines

Da die Erfüllung der gestellten Steuerungsaufgaben durch die NC Voraussetzung für deren Einsatz an sich ist, wendet man sich mit erhöhter Aufmerksamkeit dem Langzeitverhalten zu. Beide faßt man neben ästhetischen, arbeitsschutztechnischen u. a. Gesichtspunkten zur Qualität zusammen. Mit der Zuverlässigkeit stehen Aufwendungen für Service, Garantieleistungen, Ersatzteile, Regreß, Ausschuß usw. in so enger Beziehung, daß die zu erwartenden Bedingungen schon im Entwurfsstadium zu prognostizieren sind. Das volkswirtschaftliche Ziel ist die Minimierung der Verluste beim Hersteller und die möglichst ungestörte, qualitätsgerechte Produktion beim Anwender der NC.

Trotz Wartung treten an NC unvorhergesehene, stochastisch verteilte Betriebsunterbrechungen durch Funktionsunfähigkeit auf, indem mindestens ein Parametergrenzwert überschritten ist. Diese lassen sich nur durch statistische Verteilungsfunktionen annähern. Die Entwicklung dieses Wissenschaftszweiges ist noch voll im Fluß. Insbesondere liegen die mit statistischen Methoden und im Zeitrafferverfahren zu gewinnenden Kennwerte und die quantitative Einwirkung äußerer Faktoren noch wenig fundiert vor.

Es sei davor gewarnt, statistischen Methoden einen zu großen Aussagewert für das Einzelerzeugnis beizumessen; denn alle wahrscheinlichkeitstheoretischen Aussagen gelten nur für eine repräsentativ große Menge und nicht für das Einzelelement aus dieser Menge.

8.3.2. Begriffe

In vielen Veröffentlichungen [6.37] [8.15] bis [8.27] haben sich Begriffsdefinitionen auf der Grundlage der Standards TGL 200–0028/01 und TGL 26096 herausgebildet.

Zuverlässigkeit ist die Fähigkeit einer Betrachtungseinheit, während einer meist großen Zeitdauer oder einer anderen Arbeitseinheit (z. B. Schaltspiele) den aus ihrer Verwendung resultierenden Beanspruchungen bei Einhaltung der Parameter zu genügen.

Die Zuverlässigkeit bestimmt die Lebensdauer bei nicht gegebener Reparaturfähigkeit, kennzeichnet Fehlerfreiheit und schließt Lager- und Transportfähigkeit ein.

Man unterscheidet

- Prüfzuverlässigkeit (ermittelt bei der Prüfung)
- Nennzuverlässigkeit (Wert zur Klassifizierung des Erzeugnisses)
- Entwurfszuverlässigkeit (theoretischer Rechenwert)
- Betriebszuverlässigkeit (unter Einsatzbedingungen ermittelt).

Fehler sind Überschreitungen eines Grenzparameters über die Toleranzgrenze hinaus, der aber nicht zwingend zum Ausfall führt.

Ein Ausfall bei einer am Beginn fehlerhaften technischen Einheit ist das Auftreten mindestens eines Fehlers, der zur Funktionsuntüchtigkeit führt. Er kann teilweise (z. B. Anzeigeeinheit) oder gesamt (z. B. Netzteil) sein. Bei Teilausfall kann unter Einschränkungen weitergearbeitet werden. Ausfälle können spontan oder durch Driften entstehen. In [8.28] wird die Verteilung bei NCM mit 32:68 angegeben.

Bei ordnungsgemäßem Entwurf können ein oder mehrere Bauelemente fehlerhaft sein, ohne daß das Gesamtsystem schon ausfallen muß. Die Systemberechnungen erfolgen nach den statistischen Methoden „worst-case" (Berücksichtigung aller ungünstigen Fälle), der „Monte-Carlo-Methode" (spieltheoretische Zufälle in statistischer Simulation) und der statistischen Tolerierung.

Redundanz im Sinne der Zuverlässigkeit ist das Vorhandensein zusätzlicher, bis zum Ausfallzeitpunkt nicht funktionsbedingter Einheiten. Aktive Redundanz ist ständig im Einsatz (z. B. Doppelkontakt), während bei passiver Redundanz die Einheit erst bei Störung einspringt. NC sind aus ökonomischen Gründen nicht mit Redundanz zur Ausfallminderung ausgestattet.

Die Ausfalldauer (t_A) ist die Zeitdauer vom Ausfall bis zur wiedererlangten Betriebsfähigkeit reparierbarer Systeme

$$t_A = t_W + t_{\text{Fehlersuche}} + t_{\text{Rep}} + t_{\text{Inbetriebnahme}} \cdot \tag{8.1}$$

Der zugehörige statistische Wert ist die mittlere Dauer eines einzelnen Ausfalls MTTR (englisch mean time to repair).

Die Verfügbarkeit ist die statistische Wahrscheinlichkeit des betriebsbereiten Zustands (m, q s. Abschn. 8.3.3.)

$$V = \frac{\Sigma\, t_B}{\Sigma\,(t_B + t_A + t_W)} = \frac{m}{t_A + m} = (1 - q). \tag{8.2}$$

8.3.3. Wahrscheinlichkeitstheoretische Grundlagen

Zur Vertiefung wird empfohlen [2.13] [8.15] bis [8.24].

Die Ausfallrate $\lambda(t)$ ist die Wahrscheinlichkeit des Ausfalls im Intervall $[t, t+\mathrm{d}t]$ für Erzeugnisse, die das Alter t erreicht haben. Sie stellt die relative, auf den Bestand zum Zeitpunkt t bezogene Bestandsänderung je Zeiteinheit als Maß für die Anfälligkeit dieser Elemente dar.

Im nicht reparierbaren System gilt die Ausfallquote

$$q(t) = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t)} \cdot \frac{1}{\Delta t} \tag{8.3}$$

als Verhältnis der temporären Ausfallhäufigkeit zum Zeitintervall Δt

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \to 0} q(t). \tag{8.4}$$

Wegen Gl. (8.6) wird nach Multiplikation mit $\frac{N(0)}{N(0)}$ [$N(0)$ Anfangsbestand]

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t) \cdot \Delta t} = \frac{-1}{R(t)} \cdot \frac{\mathrm{d}\, R(t)}{\mathrm{d}\, t} = \frac{-r(t)}{R(t)}. \tag{8.5}$$

Die konstanten λ-Werte für Zufallsausfälle (Bild 8.5) sind für jeden Bauelementetyp anzugeben, abgeleitet aus der Lebensdauerverteilung $R(t)$.

Die Überlebenswahrscheinlichkeit R bzw. Lebensdauerverteilung $R(t)$ gemäß Bild 8.6

$$R(t) = \lim_{N(0) \to \infty} \frac{N(t)}{N(0)} = 1 - F(t) \tag{8.6}$$

kennzeichnet die Wahrscheinlichkeit für einen Bestand N (0), den Zeitpunkt t zu überleben (Ausfall *nach* der Zeit t). Die Dichtefunktion $r(t) = R'(t)$ gibt die Lebenserwartung der nach t verbliebenen Elemente an.

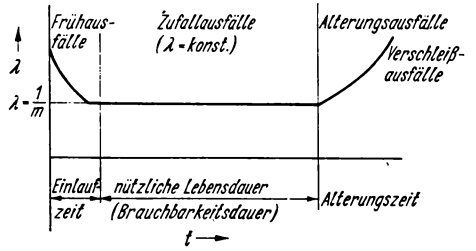


Bild 8.5. Ausfallratefunktion

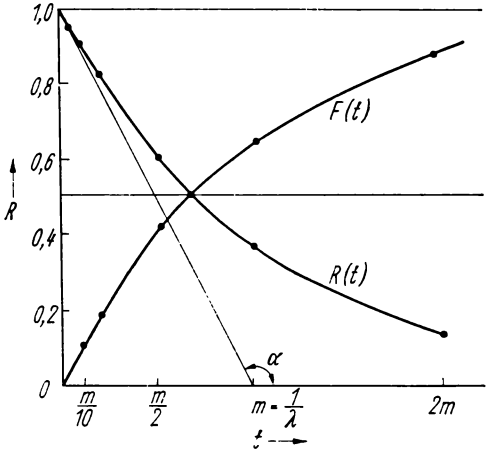


Bild 8.6. Zuverlässigkeits- bzw. Ausfallkurve $\lambda(t) = \lambda = konst.$

Die Ausfallwahrscheinlichkeit F bzw. Ausfallverteilung $F(t)$ nach Gl. (8.6) kennzeichnet die Wahrscheinlichkeit für einen Bestand N (0), bis zum Zeitpunkt t auszufallen. Die Dichtefunktion $f(t) = F'(t)$ gibt die Ausfallwahrscheinlichkeit im Intervall $[t, t + \mathrm{d}\,t]$ an.

Für reparierbare (gewartete) Systeme und λ = konst. ist der mittlere Ausfallabstand m (MTBF mean time between failure), mittlere Fehlerabstand (m Moment der Lebensdauer) oder nach ASMW-VW 500 die mittlere Funktionsdauer der mathematische Erwartungswert der Betriebszeitspanne zwischen zwei benachbarten Ausfällen oder der arithmetische Mittelwert der ausfallfreien Zeitabschnitte. Er kennzeichnet die mittlere Lebensdauer der Einzelelemente. Seine Angabe erfolgt mit einem Vertrauenskoeffizienten $K_x(n)$ bei der statistischen Sicherheit x. Für $x = 0{,}5$ bis 0,95 als Parameter sind in ASMW-VW 500 die $K_x(n)$, abhängig von $n = 1$ bis 10 Ausfällen, angegeben. Für konstantes $\lambda(t)$ gilt

$$\lambda(t) = \text{konst.} = \frac{1}{m}. \tag{8.7}$$

Beispiel: Ermittlung der während des Zuverlässigkeitsnachweises zulässigen Ausfälle n bei IC.

Laut TGL 24951 ist

$$\lambda_N = 10^{-7}\,\mathrm{h}^{-1}, \quad \lambda_{Pr} = 10^{-5}\,\mathrm{h}^{-1}.$$

Prüfzeit $t_{Pr} = 2500$ h, $N(0) = 500$ IC,

statistische Sicherheit $x = 0{,}8$,

$$K_{0,8}(n) \leqq 2500 \cdot 500 \cdot 10^{-5} = 12{,}5.$$

Laut ASMW-VW 500 Ausgabe 12.68 sind $n \leqq 10$ Ausfälle zulässig.

Ausfallrate λ, mittlerer Ausfallabstand m und Lebensdauerverteilung $R(t)$ dienen zur Darstellung der Systemzuverlässigkeit. Die allen zugrunde liegende Überlebenswahrscheinlichkeit R ist durch geeignete statistische Verteilungsfunktionen zu beschreiben.

Gl. (8.5) integriert, Anfangsbedingung $R(0) = 1$ (kein Ausfall), ergibt

$$R(t) = \mathrm{e}^{-\int_0^t \lambda(t)\,\mathrm{d}t} \tag{8.8}$$

Die Bedingung $\lambda(t) = \lambda =$ konst. gemäß Bild 8.5 für Zufallsausfälle führt zur Exponentialverteilung

$$\begin{aligned} &R(t) = \mathrm{e}^{-\lambda t}; \quad F(t) = 1 - \mathrm{e}^{-\lambda t} \\ &r(t) = -\lambda\,\mathrm{e}^{-\lambda t}; \quad f(t) = \lambda\,\mathrm{e}^{-\lambda t}; \quad t \geqq 0. \end{aligned} \tag{8.9}$$

Bei dieser wird der mittlere Ausfallabstand $m = 1/\lambda$ nur mit einer Überlebenswahrscheinlichkeit $R(m) = \mathrm{e}^{-1} = 0{,}368$ erreicht.

Bei abweichenden Überlebenswahrscheinlichkeiten ändert sich der notwendige Ausfallabstand wesentlich, z. B.

$$\begin{aligned} &R\left(\frac{m}{20}\right) \approx 95\,\%; \quad R\left(\frac{m}{10}\right) \approx 90\,\%; \quad R\left(\frac{m}{4{,}5}\right) \approx 80\,\%; \\ &R\left(\frac{m}{2}\right) \approx 60\,\%. \end{aligned} \tag{8.10}$$

Soll z. B. die Betriebsfähigkeit mit 80%iger Sicherheit ($R = 0{,}8$) über $t = 600$ h erhalten bleiben, wird nach Gl. (8.9)

$$0{,}8 = \mathrm{e}^{-\lambda \cdot 600}$$

$$600 \cdot \lambda = \ln 1{,}25 = 0{,}223$$

$$\lambda = \frac{0{,}223}{600} = 0{,}372 \cdot 10^{-3}; \quad m = 2690\,\mathrm{h}$$

bzw. $4{,}5 \cdot 600 = 2700$ h nach Gl. (8.10).

Konstante Ausfallrate heißt, daß das Verhalten der Elemente zeitunabhängig (invariant) und alterungsfrei ist und Ausfälle nur zufälligen Einflüssen unterliegen.

Da die Exponentialfunktion Früh- und Alterungsausfälle nicht berücksichtigt, wurden zusätzlich andere Verteilungen vorgeschlagen (Gaußsche Normalverteilung, Weibull-, Gamma-, Poissonverteilung).

Das Verhalten der Elemente bei unterschiedlicher Belastung ist qualitativ im Bild 8.7 dargestellt [6.37] [8.16]. Die in [8.17] angegebenen Umweltfaktoren ergeben wesentlich zu schlechte Werte.

Statistische Berechnungen von Ausfallraten nach aufwendigen Dauerprüfungen sind in [8.15] [8.19] [8.20] [8.21] angegeben. Sinkende λ-Werte verlangen Zeitraffermethoden (thermisch, elektrisch, mechanisch höhere Beanspruchung).

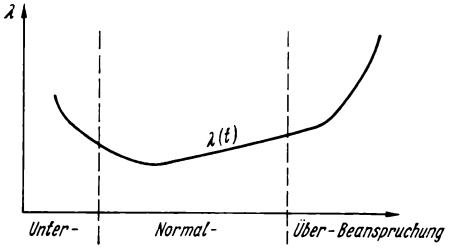


Bild 8.7. Ausfallrate in Abhängigkeit der Belastung nach Tretter

Zur mathematischen Betrachtung der Zuverlässigkeitswerte fordert der Gerätehersteller vom Bauelementeproduzenten die Angabe der λ-Werte, deren Ermittlung in Dauerprüfungen zeit- und kostenaufwendig ist.

Die bisherigen Betrachtungen für im Sinn der Zuverlässigkeit nicht mehr teilbare Elemente sind auf zusammengesetzte Systeme zu erweitern.

Parallelsysteme weisen Redundanz auf und fallen erst nach Ausfall aller Teilsysteme aus. Für die Exponentialfunktion ergibt sich [8.22]

$$R_{\text{ges, par}}(t) = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - e^{-\lambda_i t});$$

Π Produkt. (8.11)

Bei Seriensystemen führt der Ausfall einer Einheit zum Gesamtausfall, so bei NC. Meistens führt tatsächlich der Ausfall eines Elements zum Gesamtausfall (Meßeingänge, Leseransteuerung, Signalspeicherung, Taktversorgung, Wegsteuerung, Ausgabe zur Anpassung usw.). Hierzu zählen auch Ausfälle, die sich durch Programmänderungen umgehen ließen (aufrufbare Vorwahlschaltergruppe, Kettenmaßverarbeitung, Rückwärtslauf, Unterprogramme usw.). Die Anzeigefunktionen sind z. T. nicht betriebswichtig – sie führen nur im Fall des Einrichtens zum Ausfall –, desgl. die Bandwickeleinrichtung.

Wenige Bauelemente werden als Parallelsystem eingesetzt, so Stützkondensatoren auf Kartenbaugruppen, z. T. Kondensatoren in Filtern, Dioden zur Pegelanhebung u. ä.

Beim Seriensystem gilt bei voneinander unabhängigem Ausfallverhalten (keine Sekundärausfälle) der Elemente:

$$P(T_g > t) = \prod_{i=1}^{n} P_i(T_i > t);$$

T_g Ausfallzeitpunkt des Gesamtsystems
T_i Lebensdauer des Elements,

$$R_{\text{ges, ser}}(t) = \prod_{i=1}^{n} R_i(t) = \prod_{i=1}^{n} e^{-\int_0^t \lambda_i(t)\,dt} \approx e^{-\int_0^t \sum_{i=1}^{n} \lambda_i(t)\,dt} \tag{8.12}$$

Aus Gl. (8.12) für die Exponentialverteilung mit $\lambda_i = \text{konst.}$

$$R_{\text{ges, ser}}(t) = \mathrm{e}^{-\sum_{i=1}^{n} \lambda_i t} \tag{8.13}$$

Gl. (8.13) sagt aus: Im Lebensdauerbereich müssen die λ-Werte der Elemente summiert werden, um die Überlebenswahrscheinlichkeit des Systems zu erhalten. Je größer die Summe ist, um so kleiner ist die Überlebenswahrscheinlichkeit.

Gl. (8.7) gilt auch für die Summe $m = \dfrac{1}{\sum_{i=1}^{n} \lambda_i}$. (8.14)

Man bildet demnach die Summe der Ausfallraten der Elemente oder Baugruppen und errechnet die MTBF.

Die Näherung durch die Exponentialverteilung Gl. (8.14) ist nach [8.24] für Systeme auch dann zulässig, wenn die Elemente dieser Verteilung nicht gehorchen (z. B. gilt für Transistoren die Normalverteilung [8.15]). Frühausfälle müssen abgeklungen (IC $\geqq$ 500 h), Verschleißausfälle dürfen noch nicht vorhanden sein. Bauelemente, die unvermeidbar vorzeitig verschleißen, sind als Verschleißteile rechtzeitig auszuwechseln.

Das praktisch wesentlich bessere Istergebnis, als nach der Rechnung erwartet werden durfte, deutet darauf hin, daß die Unterbelastung der Elemente und das breite Toleranzband zum Abfangen von Arbeitspunktwanderungen von wesentlichem Einfluß sind. Weiterhin scheinen die λ-Werte mit Sicherheitsfaktoren versehen zu sein, und die Betrachtung als reines Seriensystem ist offensichtlich zu hart, zumal einige Elemente nicht in allen Programmen angesprochen werden. Die Zuverlässigkeit der mathematischen Näherung [8.23] wird im Einzelfall nachgewiesen, in [8.27] z. B. mit Anpassungstest von *K. Pearson* die Näherung durch eine Poissonverteilung.

8.3.4. Zuverlässigkeit ausgeführter NC

Die praktische Berechnung durch Addition der λ_i-Werte jedes Einzelelements i erfolgt somit unter folgenden Prämissen:

- Frühausfälle abgeklungen, $\lambda_i = \text{konst.}$
- λ_i-Wert liegt bestätigt vor
- reines Seriensystem
- ohne Berücksichtigung der Belastungsverhältnisse
- Anzahl gleichartiger Elemente n_i

$$\lambda_{\text{ges}} = \sum_{\text{alle } i} n_i \cdot \lambda_i. \tag{8.15}$$

Trotz unvollständiger und statistisch noch nicht ausreichend gesicherter Primärdaten weist Gl. (8.15) die Schwachstellen bzw. Schwerpunkte der Betrachtung qualitativ aus, wenn man die Summanden $n_i \cdot \lambda_i$ ins Verhältnis zur Summe setzt.

Zur Steigerung der MTBF sind die Elemente zu verbessern bzw. zu ersetzen, die den größten Anteil an der Summe haben. Die errechneten absoluten Werte bleiben unter den gegebenen Voraussetzungen jedoch fragwürdig. Als Anhalts-

werte seien einige λ-Werte typischer Bauelemente einer NC genannt, die gemittelt aus diversen Literatur- und Herstellerangaben oder im Analogieschluß geschätzt wurden [λ in $10^{-6}\,h^{-1}$]:

integrierter Schaltkreis	0,1
Transistor	0,5
Diode	0,1
Z-Diode	0,5
UKW-Drossel	0,1
Kondensator (Folie, Scheibe u. ä.)	0,1
Tantalkondensator	1
Schichtwiderstand	0,1
Steckkontakt	0,01
Lötstelle, Maschinenlötung	0,001
Wickelverbindung	0,001
Lötstelle, Handlötung	0,01

Mit dieser Methode errechnet sich [8.25] für eine Kartenbaugruppe mit IC, 170 mm × 215 mm, als Mittelwert

$$\lambda = 8{,}5 \cdot 10^{-6}\,h^{-1}.$$

Rechnung und praktische Anschauung zeigen, daß bei einer NC die Kartenbaugruppen den größten ($\approx 70\%$) und einen nicht zu unterschätzenden Anteil die Lochstreifenleser haben. Als Anhaltswert der mittleren störungsfreien Zeit moderner NC können $m > 1000 \cdots 2000$ h dienen. Der Zusammenhang zwischen MTBF(m) und Verfügbarkeit (V) ist in Gl. (8.2) gegeben. Man erkennt, daß die den Betreiber vorrangig interessierende Verfügbarkeit neben dem Erzeugniskennwert stark von organisatorischen Problemen (Serviceorganisation) abhängt, dargestellt durch die Ausfallzeit t_A mit dem größten Summanden Wartezeit (t_W). *W. Carter* [8.29] nennt als Verfügbarkeit 98%.

9. ADAPTIVE REGELUNG

9.1. Allgemeines

Unter einem adaptiven Regelungssystem [englisch (self-)adaptive control, AC] versteht man eine technische selbstanpassende (selbstoptimierende) Regeleinheit zur Beeinflussung von Systemparametern auf Grund der Messung verschiedener Zustandsgrößen des Systems [9.1] [9.2].

Man teilt die AC für Werkzeugmaschinen (Entwicklung seit 1962) ein in die Grenzwert- oder Auslastungsregelung (englisch adaptive control constraint, ACC), die den Prozeß nach einem bzw. mehreren technisch zulässigen Grenzwerten führt, die Regelung zur Anpassung an geometrische Bedingungen (englisch adaptiv control geometrically, ACG) und die selbstoptimierende Regelung (englisch adaptive control optimization, ACO), die den Prozeß nach einem mathematischen Modell der ökonomischen bzw. Qualitätsbewertung [9.2] führt. Daneben muß man in AC für Grob- und Feinbearbeitung unterscheiden, letztere unter weitgehender Erfassung des Werkzeugverschleißes.

Die AC erfüllt je nach Konzeption folgende Aufgaben [9.1] bis [9.3]:

- Steigerung der Produktivität durch Senkung der Grundzeiten an NCM und konventionellen Werkzeugmaschinen (Großmaschinen, Werkzeuge hohen Materialwertes, automatische Drehmaschinen für große Lose)
- Senkung des Ausschusses, besonders bei teuren Werkstücken
- Erhöhung der Bearbeitungsqualität, Oberflächengüte (Steigerung der Genauigkeit um 1 bis 2 IT-Klassen bei Feinbearbeitung [6.47] auch bei Massenfertigung)
- Bestimmung der technologischen Werte entsprechend den tatsächlichen Schnittbedingungen (Senkung des Maschinenverschleißes)
- Schutz von Maschine und Werkzeug vor Überlastung (Erhöhung der Standzeit der Werkzeuge [9.4])
- Prozeßüberwachung und -kontrolle an Taktstraßen
- Senkung der Programmierzeit durch selbständige Schnittaufteilung
- Senkung der Kosten.

Vollmer gibt in [9.5] die Aufwendungen für das Spanen in den USA mit täglich 600 Mill. M an. Daraus läßt sich der Nutzen bei Intensivierung dieses Prozesses sowohl durch NC als auch AC ableiten.

Die Entwicklung von Schneidwerkstoffen höherer Standzeit und Temperaturbeständigkeit – in der SU werden bereits Wegwerf-Diamanten hergestellt [9.4] – führt zu höheren Antriebsleistungen, die von einer AC voll abgefordert werden. AC wird vorwiegend bei Drehmaschinen, aber auch beim Fräsen, Schleifen, als Hardware-Lösung [9.6] eingesetzt, wobei eine echte Verbesserung der Prozeßführung eintritt. Daneben wird sie vorhandenen Prozeßrechnern (CNC) ohne erheblichen Mehraufwand übertragen.

Die AC berücksichtigt im Bearbeitungszyklus die unvermeidbaren Störfaktoren Werkstoffeigenschaften, Werkzeugverschleiß, Materialinhomogenität, Schnittunterbrechung, unterschiedliches Aufmaß, Deformation, Reibung, Erwärmung u. ä.

Während also die NC eine unvollkommene externe Optimierung des Bearbeitungsprozesses mit Hilfe empirisch gefundener oder mathematisch formulierter Werte (Standards, Tabellen) unter Berücksichtigung von Sicherheitszuschlägen erreichen läßt, wird mit AC innerhalb des Prozesses selbst das technologische Optimum angestrebt.

Grundsätzlich ist adaptive Regelung nicht an eine NC gebunden. Sie ist deshalb eine Ergänzung und keine Alternative zur Numerik.

Zur Identifizierung der Prozeßparameter werden diese entweder direkt gemessen oder indirekt, z. T. über Berechnungen ermittelt. Gemessen werden:

- Drehmoment, hilfsweise Motorstrom
- Spindeldrehzahl als Hilfsgröße
- Schnittkräfte bzw. Gegenkräfte
- Schneidentemperatur
- Schwingungen
- elastische Verformung durch Verwinden oder Auslenken der Spindel bzw. Bohrstange
- elastische Verformung anderer Maschinenteile (Bett, Ständer u. ä.). Diese sind eine genauigkeitsmindernde Größe, jedoch sehr gering.

Der eigentliche Verschleißzustand kann vorerst kaum kontinuierlich (nötig bei Werkzeugstandzeiten bis 10 min), sondern nur diskret unter Kenntnis des Zusammenhangs Meßgröße – Verschleiß, außerhalb des Eingriffs (hohe Standzeit) erfaßt werden. Verschleißmessung über die Hilfsgröße Temperatur ist nicht definiert, obwohl Zusammenhänge bestehen. Auch der Zusammenhang zwischen Verschleißgeschwindigkeit und Temperatur ist nicht angebbar.

Neu sind pneumatische Sensoren mit Prallplattenverfahren, industriell nutzbare Sensoren stehen nur eingeschränkt zur Verfügung [9.8]. Die zur Meßwerterfassung notwendigen zuverlässigen Sensoren müssen den rauhen Bedingungen (Schmutz, Schmier- und Kühlmittel, Temperatur) genügen.

Zur Wandlung nichtelektrischer in elektrische Größen dienen (z. T. mit trägerfrequenzmodulierten Spannungen und driftarmen Verstärkern):

- magnetoelastische Kraft- und Drehmomentgeber bzw. Halbleiter-Dehnungsmeßstreifen
- piezoelektrische Kraftmeßgeber
- kapazitive und pneumatische Druckgeber
- Halbleiter-Dehnungsmeßstreifen zur Schwingungsmessung, in denen Drehmomentschwankungen erkannt werden, noch ehe am Support Veränderungen bemerkt werden
- Strahlungspyrometer und Thermoelemente zur Temperaturmessung
- induktive Stromwandler bzw. Hallgeneratoren für Gleichstrommessung
- fotoelektrische Weggeber.

Das Auflösungsvermögen liegt bei kleinem Meßweg 1:10 bis 1:50, Störgrößen der Übertragung sind Temperatur und Fremdfelder [6.2].

Durch die AC werden folgende Stellgrößen beeinflußt:
- Vorschub (Stellbereich 1:3 bis 1:10, Leerschnitt bis 4fach)
- Schnittiefe (Zustellung)
- Schnittgeschwindigkeit (Spindeldrehzahl), nur in Ausnahmefällen.

Vorwiegenden Einsatz erhalten AC-Systeme mit Vorschubregelung, als einfachste Ausführung auch ohne Erhöhung bei „Leerschnitt". Bild 9.1 gibt die Grenzkurven im Vorschub-Schnittiefendiagramm wieder.

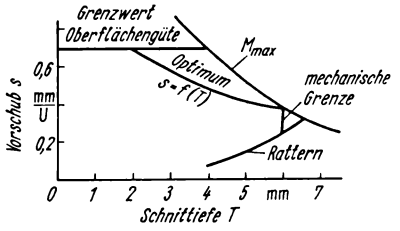


Bild 9.1. Vorschub-Schnittiefendiagramm bei ACC [9.10]

Verschiedene Literaturstellen geben bei AC-Einsatz Produktivitätssteigerungen von 20 ··· 260% an, als repräsentativer Wert dürften 20 ··· 50% gelten [9.5]. Die Einsparungen beim Fertigmaßprogrammieren und automatischer Schnittaufteilung liegen zwischen 20 und 60%.

Eine iterativ arbeitende AC [9.9] ermittelt die Schnittbedingungen am ersten Werkstück und optimiert daraus das Programm im Rechner. Nach 3 Läufen wird ein nahezu optimales Programm erreicht.

9.2. Auslastungsregelung (ACC)

Die Störgrößen Z (Bild 9.2) sowie Differenzen zu einem oder mehreren eingegebenen Grenzparametern (Festwertkriterien) werden durch die ACC ausgeregelt, ohne den Zustand des Werkzeugs zu berücksichtigen. Die Grobbearbeitung (Schruppen) ist dominierend und lohnt sich bei Werkstücken unterschiedlichen Aufmaßes (Groß-, freiformgeschmiedete bzw. gewalzte Rohlinge).

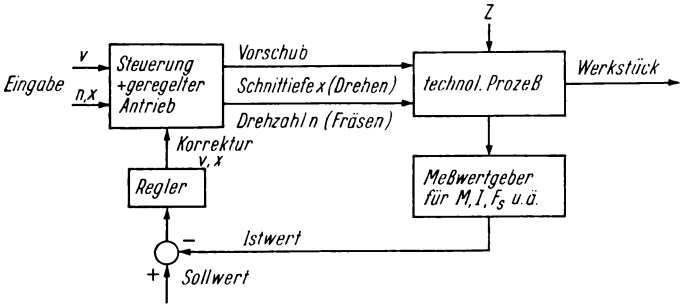


Bild 9.2. Beispiel einer ACC an einer Werkzeugmaschine

Bei der Vorschubregelung ACC – NC 430 dient die Schnittkraft, gemessen in magnetoelastischen Kraftmeßdosen von 1600 bis 4000 N, als dominierende Hauptzustandsgröße, die in einem Trägerfrequenzkreis von 20 kHz das Brückengleichgewicht (2 gleiche Dosen wegen Temperaturgang) verstimmt. $U_{\text{Brücke}} \sim F$ wird AD-gewandelt und mit dem 2dekadischen Sollwert verglichen. Die Motorlast wird vom Wirkstrom gekennzeichnet, als Hilfsgröße dient die Spindeldrehzahl.

Der Vorschub wird durch eine im Spannungs-Frequenz-Wandler erzeugte Frequenz von 250 bis 1000 kHz von (0,5 bis 2) S_0 verändert. Die Erhöhung kann vom Programm begrenzt werden.

Es gelten die Befehle (TGL 200-0863/07 Entw. 4.74, Variante 1):

L0, L1	ACC „Aus", ACC „Ein"
L2, L3	S_H „Aus"; S_H „Ein" (bei Leerschnitt über 1 Umdrehung Maximalvorschub $4 \cdot S_0 \triangleq 2$ MHz)
L4, L5, L6	$1{,}25 \cdot S_0$; $1{,}6 \cdot S_0$; $2{,}0 \cdot S_0$ (obere Vorschubgrenze)
L 700... 799	Sollwerte der Schnittkraft (F_{Soll})
L8, L9	Anschnittschaltung „Aus"; desgl. „Ein" (d. h. 16 Umdrehungen ohne Vorschuberhöhung nach dem Anschneiden).

Der Anstellvorschub S_H wird nach dem Anschnitt (1 Umdrehung und 200 ms, $F > 0{,}2\, F_{\text{Soll}}$) auf den Grenzvorschub (L4 bis L6) reduziert und nach dem Schnitt wieder auf S_H erhöht. Höherfrequente Sollwertänderungen werden durch $v =$ konst. über 1 Umdrehung verhindert.

Bei Überlast und $v_{\min}$ wird abgeschaltet ($F > 1{,}4\, F_{\text{Soll}}$). Die Anschnittsteuerung benötigt eine hohe dynamische Güte des Regelkreises mit $k_v \approx 10$ bis $60\,^1/_s$ bei $\omega_0 = 100$ bis $150\,^1/_s$.

Eine Abrüstung auf nur eine Meßgröße ist die unterste, eine Aufrüstung bis vier Meßgrößen die obere Ausbaustufe.

Bei Drehmaschinen werden Kraft und Moment, bei Fräsmaschinen Abbiegung, Schwingung und Motorstrom als Meßgröße bevorzugt.

Die Funktionsblöcke der AC werden baukastenförmig aufgebaut:

- Meßwertgeber und Meßelektronik
- Last- und Leerschnitterkennung
- Überlastabschaltung
- Mehrfachgrenzwertregler für mehrere Auslastungsparameter mit dem Vorschub als Stellgröße
- Schnittaufteilung [9.11].

Letztere arbeitet in zwei Arten:

- Schnittiefenregelung unter Verwendung einer prozentualen Rückzugsbewegung vom Zustellwert
- automatischer Schnittzyklus bei Endkonturprogrammierung, wobei selbständig zwischenliegende Konturschnitte ermittelt werden. Es erfolgt eine Optimierung der Schnittzahl bei vereinfachter Programmierung und eine zyklische Abarbeitung des Aufmaßes.

Am Grenzwert wird meist erst der Vorschub, danach die Schnittiefe reduziert. Die Stelle, an der die programmierte Kontur verlassen wurde, ist zu speichern (Bild 9.3). Aus der AC wird zum Einleiten des Schnittzyklus ein Signal an die Steuerung ausgegeben. Für die Rückzugsbewegung ist eine geeignete Strategie

zu entwickeln, wobei prozentuale Anteile des Rückzugs von der vorherigen Zustellung zu fixieren sind. Die Zustellung soll möglichst bis zum Endmaß erfolgen, ist Rückstellung nötig, wird im gleichen Schnitt nicht wieder zugestellt. Bei Mindestbelastung und v_{max} erfolgt Abbruch des Schnittes, Rückbewegung und erhöhte Zustellung, bis die Fertigkontur erreicht ist.

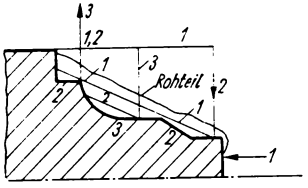


Bild 9.3. Beispiel einer Schnittaufteilung

Maßgebend ist beim Fräsen der Rückzugswinkel zum Vorschubvektor, dessen falsche Wahl zum Freischneiden führen kann. „Außer Schnitt" ist nur zulässig, wenn der Wiedereintritt in bearbeitete Flächen erfolgt (Bruchgefahr).

Selbsterregte Schwingungen (Rattern) mit einem geringen Frequenzband werden durch Vorschuberhöhung – soweit möglich – oder einfacher durch Schnitttiefenreduzierung beseitigt, bei fremderregten – durch Kraftwechsel erzeugt – reduziert man auf v_{min}, danach erst die Schnittiefe.

Für die Programmierung ist TGL 200–0863/07 Entw. 4.74, Variante 2 zu verwenden, bei der die Befehlszahl (Unteradressen) erweitert ist.

Entwicklungstendenzen nennt *Kaminskaja* [9.12]. Untersuchungen an „selbstanpassenden Reglern", deren Verstärkungsfaktor variabel und deren Zeitkonstante von der Hauptspindeldrehzahl abhängt, zeigt [9.13] auf.

Neben der Grobbearbeitung dient ACC-fein zur Steigerung der Genauigkeit, wobei die Berücksichtigung des Werkzeugverschleißes an Dreh- und Fräsmaschinen bei definierter Schneide das Hauptproblem ist [9.7]. Man erreicht eine höhere Genauigkeit bei garantierten Oberflächenwerten in den anteilig großen Schlichtphasen.

Neuartig ist die in [9.3] genannte Möglichkeit, aus den Schwingungen solche technologischen Bedingungen abzuleiten, daß der Span richtig bricht. In [9.14] werden Untersuchungen zum Zahnschleifen bei vorgegebener Oberflächenqualität, in [9.15] [9.16] die technologischen Aspekte zur Erhöhung der Bearbeitungsgenauigkeit angegeben.

9.3. Optimierungsregelung (ACO)

Diese gegenüber der ACC wesentlich aufwendigere Methode verlangt die Vorgabe einer Bewertungs-(Ziel-)funktion, die eine laufend anzuwendende Suchstrategie zum Erreichen des veränderlichen Optimums bei einschränkenden Nebenbedingungen (M_{max}, n_{max} usw.) enthält. Meist erfolgt die Minimierung der Kosten über eine Bewertungskennziffer (Gütegrad), wie

M/Spanvolumen, Stück/M, Kosten/Erzeugnis, Stück/Zeiteinheit.

Maß-, Form-, Rauheitstoleranzeinhaltung wird zur Gewährleistung der Fertigungsgüte gefordert [1.2] [9.2].

Als Arten von Optimierungsregelungen nennt [9.17]:

- Modellvergleichssysteme (Bild 9.4)
- Impulsantwortsysteme mit stochastischem Störsignal unter Verwendung von Kreuz- und Autokorrelation (statistische Methode zum Erkennen des Systems)
- Rechnersystem (CNC, Bild 9.5) als Vorzugslösung, eventuell auch mit Analogrechner.

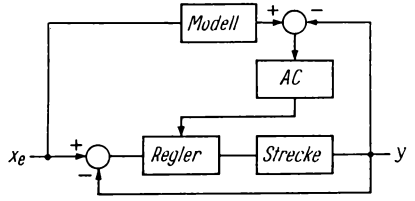


Bild 9.4. ACO, Modellvergleichssystem [9.17]

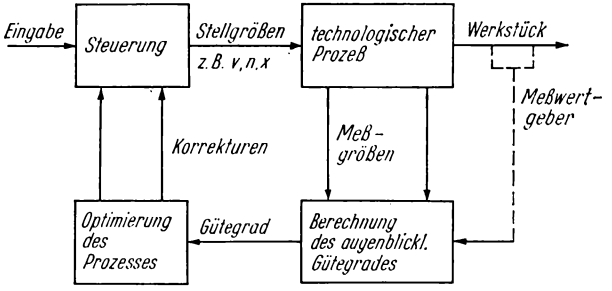


Bild 9.5. ACO, Rechnersystem

Ein Zerspanungsprozeß hängt von etwa 30 Parametern ab [9.6] [9.17]. Sein exaktes Modell ist noch nicht gefunden, die funktionellen Zusammenhänge der physikalischen Parameter sind schwierig, und ihre richtige Beschränkung ist problematisch. Außerdem kann das statische und dynamische Verhalten des Systems Maschine – Werkzeug – Werkstück bei unterschiedlichen Belastungen nicht angegeben werden. Voraussetzung für den rationellen Einsatz der ACO sind deshalb weitere wissenschaftliche Arbeiten in der Zerspanungstheorie.

Das Hauptproblem der ACO ist die Verschleißmessung [9.5] [9.8] am Werkzeug, da diese zum „ökonomischen Kriterium" wird. Zum Suchen des Optimums sind verschiedene Verfahren bekannt [9.17]:

- zeilenweise Suche
- regellose (statistische) Suche
- schrittweise Optimierung eines Parameters bei Konstanz der anderen
- Gradientenmethode
- Methode des schnellsten Fallens.

Die häufig angewendete Gradientenmethode läßt den Vorgang in Richtung des größten Gradienten bis zum Umschlag verlaufen (bei linearen Zusammenhängen Linear-Optimierung).

Sind mehrere Extrema zu erwarten, bevorzugt man das Verfahren des weißen Rauschens mit normalverteiltem Testsignal. Dadurch wird ein „minderwertiges" Optimum erkannt und das System zu einem besseren geführt [9.17].

Die günstigsten Einsatzgebiete für ACO eröffnen sich bei Werkstoffen hoher Festigkeit mit niedrigen Schnittwerten und hohem Werkzeugverschleiß sowie Material hoher Inhomogenität, d. h. bei kostenintensiver Fertigung.

Die Optimierung an Schleifmaschinen dient dem Beibehalten der Schleifscheibe bei verschiedenen Werkstücken und Werkstoffen, der Beschränkung der Oberflächenrauhigkeit und einer maximalen Werkstoffabnahme innerhalb der Scheibenstandzeit. Zur Eingabe sind Schliffbreite, Durchmesser, Bezugskraft, Werkstoffkennzahl und Arbeitsablaufkennzahl vorzusehen, gemessen werden die Schleifkraft am Lager und der Durchmesser direkt am Werkstück. Geregelt wird die Vorschub- bzw. Umfangsgeschwindigkeit der Schleifscheibe.

Unstetige Optimierung an Trennschleifmaschinen ermittelt die Kosten eines Schnittes und vergleicht mit denen des vorangegangenen. Der Eingriff des Rechners erfolgt auf die Parameter oder die Struktur des Regelkreises.

Meßsteuerungen, bei denen bestimmte Meßvorgänge ausgelöst und deren Ergebnis für Zustellbefehle verwendet werden, sind auch zu den adaptiven Systemen zu zählen. Zielfunktion ist die genaue Maßhaltigkeit. Auch hier werden die Störgrößen ausgeschaltet, ohne sie selbst zu erfassen.

Wegen des erheblichen Aufwands wird die ACO sich nur in Ausnahmefällen einführen.

10. STEUERUNGSHIERARCHIE, RECHNEREINSATZ

10.1. Steuerungshierarchie

Weitere Fortschritte in der materiellen Produktion zur Steigerung der Arbeitsproduktivität verlangen ständige Erhöhung des Automatisierungsgrades der Prozesse. Eine höchst humanitäre Aufgabe unserer Gesellschaft ist es deshalb, den arbeitenden Menschen von routinemäßiger Tätigkeit zu befreien und seine schöpferischen Fähigkeiten zum Auffinden und zur Durchsetzung neuer Ideen zu nutzen. Wir begnügen uns daher nicht mit der automatisch arbeitenden Einzelmaschine, sondern stellen die Forderung nach der Automatisierung ganzer Fertigungsabschnitte, verbunden mit der Optimierung der Prozeßdurchführung. In dieser höchsten Produktionsform wird der Mensch zum Überwacher der selbständig ablaufenden Vorgänge, ohne selbst im Prozeß unmittelbar integriert zu sein. Diese sinnvoll geförderte, den Bedürfnissen der Gesellschaft adäquate Automatisierungstechnik – die letzthin in der automatisierten Fabrik gipfelt – ist gesellschaftlicher Auftrag im Sinn der Förderung des Wachstums der materiellen Basis zum Wohl der arbeitenden Menschen. Jede Automatisierung verliert jedoch ihren humanitären Charakter, wenn mit ihr auf Grund der herrschenden gesellschaftlichen Verhältnisse soziale Unsicherheit und Arbeitsplatzverlust gekoppelt sind.

Die Prozeßrechentechnik zur Automatisierung diskontinuierlicher (Stück-) Prozesse, dem Anliegen der NC-Technik, stellt somit eine sinnvolle Ergänzung festverdrahteter NC dar und gestattet die lose Verkettung automatisierter Maschinen [5.1].

Während beim konventionellen NC-Einsatz die Eingabeinformation mit Lochstreifen bereitgestellt wird, gestattet direkter Datentransfer vom DNC-Rechner zur Steuereinheit, den Datenträger Lochstreifen auszuschalten. Grundsätzlich wirft der Rechnereinsatz weniger neuartige gerätetechnische als vielmehr organisatorisch-programmtechnische Probleme auf. Man spricht von der 4. Generation numerischer Steuerungen und beweist damit die offenbare Harmonie der NC mit der Prozeßrechentechnik.

Der Gedanke zur Rechnerhierarchie (Bild 10.1) [10.1] anstelle nur eines Großrechners ist geboren aus der Betriebssicherheit, leichteren Programmierbarkeit von Teilsystemen, verminderten Transinformationsmenge, größeren Flexibilität und der Ausbaufähigkeit in Einzelschritten. Theoretisch kann ein Rechner die Ebenen *2* bis *4* überstreichen, indem nur die Regelkreise extern verbleiben oder auch DDC-Regelung noch integriert wird (bei NC noch nicht eingeführt).

Es erfordert das Gebiet *2* Echtzeitbetrieb mit Reaktionszeiten < 1 ms;
Kernspeicher $\leqq 16$ k Byte/Maschine

Gebiet *3* Echtzeitbetrieb mit Reaktionszeiten im ms-Bereich;
Kernspeicher je nach Programmzahl.

Die Programmierung stellt keine zeitlichen Forderungen.

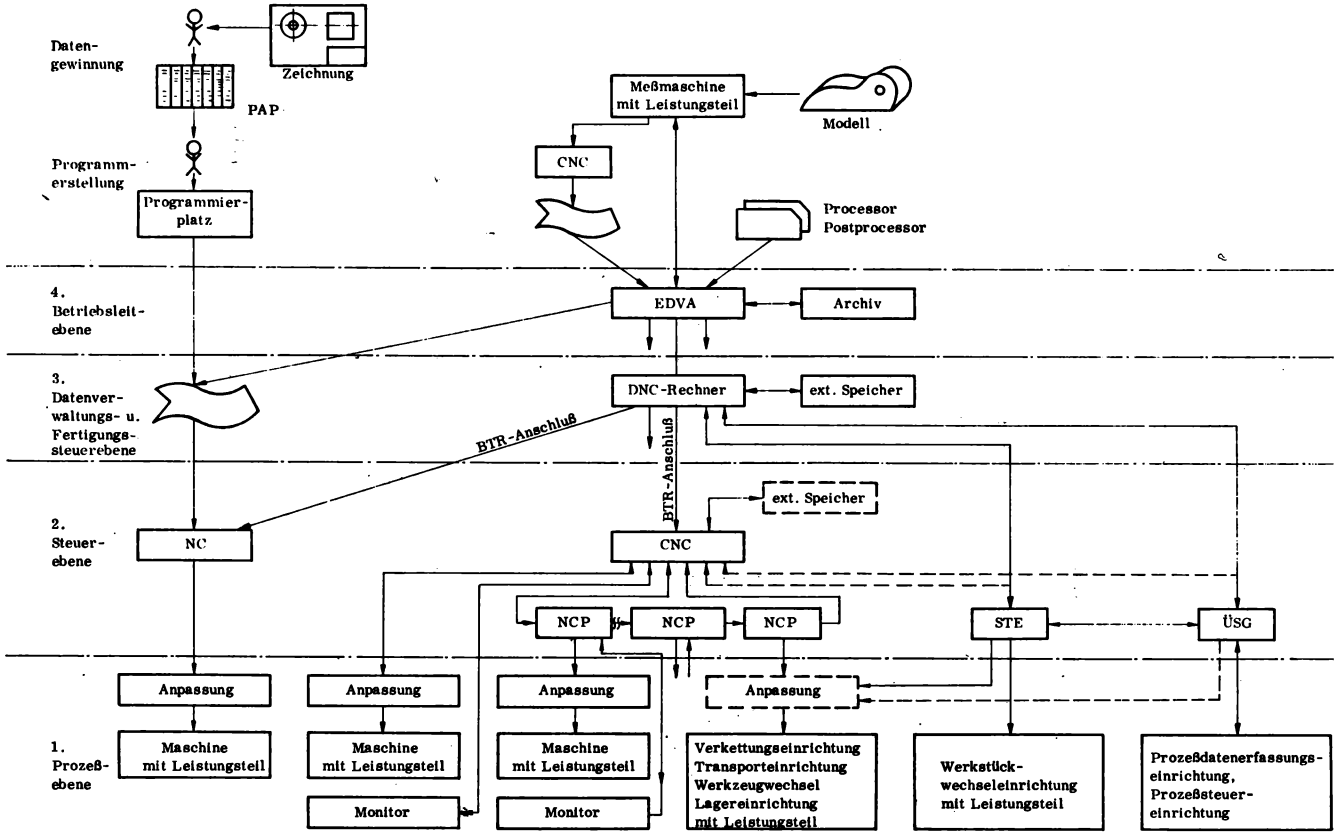


Bild 10.1. Steuerungshierarchie (ohne Darstellung von Quittungsrückmeldungen)

Betrachtet man die Übergabestelle *2* → *1* (Bild 10.1), so sind bei einer Bahngeschwindigkeit von nur 1200 mm/min und einer Auflösung von 2,5 μm schon 8000 bit/(s und Achse) zu übertragen. Daraus folgt unschwer die Unmöglichkeit der Lochstreifeneingabe bei Außeninterpolation. Für Punkt-Strecken-Steuerungen mit Abschaltkreis treten nur Bruchteile dieser Datenrate auf. Meß- und Ausgabekanal haben auch bei extremen Geschwindigkeiten und Auflösungen Impulsfolgen mit $f < 200$ kHz zu bewältigen.

In [5.8] wurde die Trennstelle *3* → *2* untersucht mit dem Ergebnis, daß bei Punkt-Strecken-Steuerungen im Mittel weniger als 10 Zeichen je Sekunde (Z/s) zu übertragen sind. Bei Bahnsteuerungen liegt die mittlere Datenrate eine Zehnerpotenz höher. In [5.10] wird als Mittelwert 48 Z/s genannt. Die mittleren Satzlängen betragen laut [10.2] für eine 2 D-Bahnsteuerung 24 Zeichen.

Die Länge eines mittleren Drehprogramms beträgt etwa 50 Sätze, die eines Punkt-Strecken-Programms kleiner prismatischer Teile etwa 80 Sätze und großer, komplizierter prismatischer Teile 300 bis 500 Sätze. Ein Bahnprogramm benötigt etwa 200 Sätze.

In [10.3] werden für Leiterplattenbohrmaschinen 80000 Z/Programm, für Verdrahtungsprüfmaschinen, Digitalisiereinrichtungen, Abtastmaschinen 400000 Z/Programm genannt. Diese Angaben kennzeichnen die Trennstelle *4* → *3*, wenn man bedenkt, daß < 2 Programme/Teil im Mittel nötig sind.

10.2. Prozeßebene

Die Prozeßebene *1* (s. Bild 10.1) enthält unabhängig von der Automatisierungsstufe die mit einem meist elektrischen Leistungsteil ausgestattete automatisierungsgerechte Maschine. Transport- und Verkettungseinrichtungen für Werkstück und Werkzeug sind Hilfseinrichtungen zur Automatisierung. Die Werkstücke werden auf Paletten justiert und gefördert bzw. durch Manipulatoren (Industrieroboter) bewegt. Auch Regalbediengeräte, Späneförderer, Waschplätze, Meßmaschinen zur Zwischen- und Endkontrolle u. ä. sind Prozeßteile zur Automatisierung. Werkzeugspeicher und -wechseleinrichtungen gestatten 100 und mehr Werkzeuge zu verwenden, die entweder Festplatzzuordnung oder Schaftcodierung erhalten.

Wie erwähnt, verändert sich die Schnittstelle zwischen den Ebenen *2* und *1*, wenn im Rechner bzw. der frei programmierbaren Anpaßsteuerung (s. Abschn. 6.1.3.) ein großer Teil der Anpaßfunktionen mit abgearbeitet wird (Speicherung, logische Verknüpfung). An der Maschine verbleibt nur noch ein Rest der Anpassung.

Datenrückmeldeeinrichtungen dienen der Fertigungssteuerung, Monitore der Mensch–Rechner(Maschine)–Kommunikation.

10.3. Steuerebene

Die Steuerebene *2* enthält die festverdrahtete NC und den frei programmierbaren Prozeßrechner als „rechnerintegrierte Arbeitsmaschinensteuerung" CNC (englisch computer- bzw. computerized numerical control). Beide Arten werden sich auch im nächsten Jahrzehnt nebeneinander behaupten.

Die in [1.10] zitierte prognostische Einschätzung, wonach 1978 90% CNC eingesetzt würden, zeichnet sich nicht ab, gleicher Stück-Anteil CNC und NC nach 1980 ist wahrscheinlicher.

Bei der CNC steuert ein universeller Prozeßrechner in direkter Prozeßkopplung (Echtzeitverarbeitung, englisch real time) über Datenkanäle, die in der NC-Peripherie (NCP) umgesetzt werden, meist eine oder mehrere NCM sowie Transport- bzw. Verkettungseinrichtungen. Diese Entwicklung wurde durch billige und zuverlässige Kleinrechner ermöglicht [4.31] [8.29], die entweder als eigenständige Einheit mit entsprechender erster Peripherie als Mehrmaschinensteuerung (CNC 500 des VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt) oder als Kern einer mit Bedientableau und Lesereingabe ausgestatteten rechnerintegrierten Steuerung [10.4] für eine Maschine fungieren (CNC 500, VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt; N 55–1 bzw. –2, LEMS, UdSSR; CNC von Tesla, ČSSR; 331 AEG, BRD; C 1000 Philips, Niederlande; System 4, Bendix, USA; NC 7300 Plessey, GB; Fanuc 200 A, Fanuc-Fujitsu, Japan; Sinumerik 580, Siemens, BRD).

CNC unterscheidet sich äußerlich von der konventionellen NC nur im Fehlen speichernder Bedienelemente (diese entfallen auch beim RAM-Festwertspeicher) sowie der z. T. vorhandenen Bildschirmeinheit. Die mit der Verdrahtung festgelegte Steuerfunktion der NC wird durch das flexible Systemprogramm der CNC ersetzt. Dabei ergibt sich der grundlegende Unterschied, daß die NC mehrere Operationen parallel (einlesen, korrigieren, rechnen, interpolieren), die CNC dagegen nur seriell abarbeiten kann, da deren Zentraleinheit nur einmal vorhanden ist.

Der Ablauf im Rechner muß so schnell erfolgen, daß die Steuerantwort trotzdem rechtzeitig (ms) im Prozeß eintrifft. Die Operationen werden deshalb im Zeitschachtelungsprinzip (englisch time sharing) mit Vorrangebenen und Unterbrechungseingängen (englisch interrupt) simultan gesteuert. Dabei geht Technologie (z. B. Halt) vor Geometrie (Interpolation).

Mit der CNC verbinden sich zusammengefaßt folgende technische Änderungen und Möglichkeiten gegenüber der konventionellen NC [5.1] [8.29] [9.1] [9.3] [10.4] bis [10.6]:

- Verwendung eines universellen Kleinrechners führt zu größeren Serien, Wegfall von Hardware-Modifikationen
- Eingabe der inneren Struktur über Systemprogramme, dadurch leichte Veränderung der Software (optimale Anpassungsfähigkeit an Maschine bzw. Arbeitsaufgabe, Codeanpassung, Einbau beliebiger Zyklen, leichte Projektierung)
- Einsatz der peripheren Geräte der Datenverarbeitung
- Verlagerung eines konstanten Teils der Informationsverarbeitung in eine spezielle Peripherie (NCP), für die der Kleinrechner die zeitlichen Bedingungen nicht einhalten kann bzw. sehr schnell überfordert wäre
- Selbstkontrolle durch Testprogramme, automatische Fehlerüberwachung und rechnergesteuerte Fehlerlokalisierung
- Einspeicherung mehrerer Werkstückprogramme im externen Speicher mit langsamem Leser
- leichte Änderung der Teileprogramme vor Ort
- Verringerung der Programmierzeit und der Lochstreifenlänge durch optimales Systemprogramm
- parabolische Interpolation
- Korrektur der Istwerte (z. B. Spindelsteigung)
- Einbeziehung des Werkzeug- und Werkstückwechsels

- Möglichkeit der Steuerung des Servoregelkreises vom Rechner aus bedingt geringen Nachlauffehler, jedoch hohe Datenrate [8.29]
- Bewältigung des ACC-Schnittzyklus ohne wesentlichen Mehraufwand
- Bewältigung der ACO überhaupt
- Bewältigung der Aufgaben von Sondermaschinen (z. B. Meßmaschinen) mittels Software
- Steuerung mehrerer Maschinen von einer CNC
- Verkettungsmöglichkeit für mehrere Maschinen (Transport)
- Erfassung von Prozeßdaten.

Ein Rechner als Kern einer NC erweitert deren Einsatzgebiet um
- Maßstabstransformationen (beliebig)
- Projektionen, Spiegelung, Entzerrungen
- Korrekturen äußerer Bedingungen
- Sonderzyklen
- Symbolgeneratoren

Integration der Maschinenanpassung.

Wegen der redundanzfreien festverdrahteten NC, die die geforderten Gebrauchswerte garantiert, ist diese im Normalfall als Einzelmaschinensteuerung der CNC ökonomisch überlegen. Das Einsatzgebiet der CNC liegt unter heutigen Bedingungen bei Sondermaschinen, vielachsigen Bahnsteuerungen, Meßmaschinen, Gruppensteuerung mehrerer Maschinen, Einbeziehung von Verkettungseinrichtungen u. ä. Mit höherer Integration der Elemente und Senkung der Rechnerkosten wird sich diese Grenze zugunsten der CNC-Einzelmaschinensteuerung verschieben. Der Einsatz der CNC ist somit als Kompromiß zwischen Flexibilität und Preis-Leistungs-Verhältnis zu wählen, wobei der Aufwand und die Spezialisierung für die Software (Systemunterlagen) nicht zu vernachlässigen ist.

Bei der Planung von CNC stehen die im Bild 10.1 gezeigten 2 Nahtstellenvarianten zur Verfügung. Man kann die Maschine mit Restanpassung und Leistungsteil entweder direkt oder über eine spezielle Peripherie ansteuern. Untersuchungen ergaben [10.5] [10.8] [10.9], daß die Entlastung des CNC-Rechners von sich ständig wiederholenden Operationen Vorteile bringt. Leitgedanke sollte sein, die Informationen am Ort ihres Entstehens möglichst vielseitig abzuarbeiten und die Transinformation zu minimieren. Alle Speicherfunktionen, Codeprüfungen und -wandlungen, Korrekturrechnungen werden dem Rechner, die Ermittlung der Soll-Istwert-Differenz (Regelabweichung) wird sinnvoll der Peripherie zugeordnet. Unterschiedlich ist die Behandlung der Interpolation. Die vorher angegebene Datenrate an der Schnittstelle *2* → *1* läßt erkennen, daß CNC ohne teilweise Verlagerung der Interpolation nach außen unökonomische Rechnerkonfiguration ergibt.

In [5.10] wird ein Rechenzeitbedarf bei 2D-Zirkular-Interpolation mit dem PR 301 bei DDA von 320 µs, bei direkter Funktionsberechnung von 200 µs angegeben und festgestellt, daß nur sehr schnelle Kleinrechner die interne Software-Interpolation zulassen.

Während in [10.8] die Interpolation in eine Grobrechnung für die Stützpunkte von Geradenabschnitten im Rechner und eine Linearinterpolation extern unterteilt ist – damit bleibt der Interpolationsalgorithmus frei wählbar –, sieht [10.5]

[10.9] die Interpolation als Hardware-Lösung vor. Die Interpolation wird somit als fest vorgegebene Routinerechnung betrachtet.

In [5.10] werden die an sich frei wählbaren Nahtstellen zwischen EDVA, CNC, NC-Peripherie und Maschine ebenfalls beleuchtet.

Normalerweise ist die Operationszeit moderner Kleinrechner für eine Addition 1 bis 4 μs, die Speicherzykluszeit beträgt 0,3 bis 2 μs. Bei der Multiplikation sind diese je nach Algorithmus unterschiedlich, z. B. beim KSR 4200 200/280 μs (mit Unterprogramm). Die angesetzte durchschnittliche Kapazität der Arbeitsspeicher beträgt 4 bis 16 k Wörter je 12 bis 16 bit.

Das kombinierte CNC/DNC-System 500 [10.5] [10.9] läßt bis 16 NC-spezifische Peripherien im NCP Ringverkehr mit SI 1.2 Interface (ESEG-Richtlinie 000.052) zu (Bild 10.1); als Kern dient der Kleinsteuerrechner KSR 4100 des VEB Kombinat Robotron mit handelsüblichem Lochstreifenleser und -stanzer, Bedien-(Fern-)Schreibmaschine sowie externen Speichern.

In der NC-spezifischen Peripherie (NCP) werden folgende Aufgaben abgearbeitet:

- Soll-Ist-Vergleich
- zweidimensionale zirkulare Interpolation
- digitale bzw. analoge Ausgabe der Sollwerte an die Servokreise
- Rangierung digitaler Informationen an die Maschine
- Bildung des Interrupts für den Rechner
- Weitergabe von Rückmeldungen vom Prozeß an den Rechner.

Die Entfernung vom Rechner zur NCP und zwischen den NCP darf ≈ 150 m betragen.

Der Monitor ist unterschiedlich für CNC- bzw. DNC-Betrieb gestaltet. Er dient zur Eingabe 6dekadischer Werte, Auslösung von Start/Stopp und der Betriebsart sowie zur Anzeige von Soll- und Istwerten, der Programmnummer, von Registerinhalten und der Betriebsart.

Der vorwiegenden Steuerung des Fertigungsprozesses dienen die im Linienverkehr mit Standardanschluß SI 2.2 arbeitenden Rechnerperipherien STE (Steuerung technologischer Einheiten) und ÜSG (Überwachungs- und Steuergeräte). In diesen sind die Steuerfunktionen für Werkstück- und Werkzeugwechsel, Datengewinnung, Regalbedienung usw. gelöst. Der BTR-Anschluß (englisch behind the tape reader [10.2]) zur NC und CNC (Bild 10.1) gestattet, Byte-Informationen im gleichen Informationsgehalt wie vom Leser zu übertragen.

10.4. Datenverwaltung und Fertigungssteuerebene

In dieser Ebene sind zwei Grundfunktionen zu verwirklichen

- Programmverwaltung und -bereitstellung
- Steuerung von Maschinensystemen.

Die Bereitstellung von Daten in Form des Lochstreifens ist die am weitesten verbreitete und wird im allgemeinen beherrscht. Zur Einführung der NC und bei Einzelfertigung wird z. T. auf den Lochstreifen verzichtet und Hand- bzw. Steckerfeldeingabe vorgezogen.

Im 2. Fall gemäß Bild 10.1 spricht man von einer Direktführung von NCM (DNC direct numerical control) [9.1] [9.3] [10.2] bis [10.5], deren Verbreitung

laut [10.2] 1973 30 Systeme betrug ([1.10] nennt 150 Einsatzfälle, [6.1] 22 in USA) und nur für umfangreiche Gruppen von Werkzeugmaschinen, dann aber mit hohem Nutzen, einsetzbar wird [9.4]. Offensichtlich wird in [10.2] die Kombination CNC/DNC (s. Abschn. 10.3) als MCU-System (englisch maschine control unit) bezeichnet.

CNC- und DNC-Rechner unterscheiden sich im Speichervolumen und der Anzahl E/A-Kanäle.

Betrachten wir den ersten Teil der Aufgabe. Ein DNC-Rechner kann viele Maschinen mit Steuerdaten versorgen, deren Anzahl weniger durch die Rechengeschwindigkeit oder Dichte des Informationsflusses,

$$\text{Datenrate } D = \frac{n \cdot l_{\text{Satz}}}{t_B} \text{ Byte/s};$$

n Anzahl Maschinen

l_{Satz} mittlere Satzlänge (s. Abschn. 10.1)

t_B mittlere Bearbeitungszeit,

als durch die Speicherkapazität sowie deren Zugriffszeit begrenzt wird. Die Kapazität der Datenbank (Magnetband, -platte, -trommel) bestimmt die Anzahl der speicherfähigen Programme. Aus dieser werden die Steuerprogramme gesamt oder teilweise in den Arbeitsspeicher der DNC transferiert und auf Anordnung zeichen-, block- oder satzweise (BTR-Anschluß) zur NC übertragen. Die Blockübertragung bringt die geringste Belastung des Rechners [10.2].

Angeschlossen werden 20 [9.3] bis 60 NCM, wobei bis 5 ms von der Anforderung bis zur Bereitstellung der Information vergehen [10.2].

Der Gesamtbetrieb ist von der durch die Bearbeitungszeit langsamen Peripherie zum DNC-Rechner gekennzeichnet, die wegen des Echtzeitbetriebs ein Unterbrechungs-Vorrangsystem (Interruptsystem, Warteschlangenproblem) verlangt. Der von *Lauber* [10.1] postulierte Satz „In einem hierarchischen Signalverarbeitungssystem nimmt die Frequenz der auszuführenden Funktionen mit steigender Ebene ab" wird an der DNC deutlich. Die Kompliziertheit der Verarbeitungsaufgabe nimmt jedoch mit steigender Ebene zu. Die Steuerdatenverwaltung allein hätte nicht zur DNC geführt.

Der DNC-Rechner erfüllt zweitens die Aufgabe, von der autarken Einzelmaschine zu Maschinensystemen mit loser Verkettung und Pufferung (Belastungsspitzen) überzugehen. Die neue Qualität dieser Fertigungssteuerung mit integriertem Informationsfluß [2.15] liegt in der Flexibilität gegenüber den starr verketteten Transferstraßen.

Während Bearbeitungszentren das Werkstück in einer Aufspannung zu bearbeiten gestatten, jedoch für extreme, selten vorkommende technologische und geometrische Bedingungen auszulegen sind, können die Maschinen eines lose verketteten Systems für die gleichen Arbeitsgänge bei Mittelserien optimal ausgelegt werden. Außerdem sind Havarieprogramme möglich, wozu eine Universalmaschine vorgesehen wird [10.2]. Neben der Organisation der Maschinenbelegung übernimmt der DNC-Rechner die Automatisierung des Werkstück-, Werkzeug- und Spänetransports und ihrer Erkennung (codierte Platten bzw. Werkzeughalter), der Beschickung und Entnahme bei Regallagern und des Wechsels der Werkstücke und Werkzeuge. Gleichzeitig wird der Prozeß aus den manuell bzw. automatisch rückgemeldeten Betriebs- und Meßdaten überwacht, die im Rechner mit der Echtzeituhr verknüpft werden. Neben den Daten zur Produktionslenkung

lassen sich damit vor allem die Standzeiten der Werkzeuge protokollieren [10.10]. Voraussetzung für die Gestaltung eines Maschinensystems ist die Ähnlichkeit der Form und Technologie der Teile, womit in rotationssymmetrische und prismatische Grundtypen unterschieden wird.

Der Nutzen liegt hauptsächlich im steigenden Auslastungsgrad der Maschinen (NC 34 bis 40%, DNC 65 bis 70% [8.26]). *Mesniaeff* gibt eine Steigerung um 15 bis 25% bei 10 bis 32 Werkzeugmaschinen an [10.6]. Von *Behrendt* [10.10] wird das Maschinensystem als wirtschaftliche Alternativlösung bei Betrieben mit Mittelserienproduktion zu solchen mit Massenfertigung gekennzeichnet.

Die DNC erhält mithin unterschiedliche Wichtung, je nachdem, ob dem zentralisierten Programm-Datenspeicher oder der Fertigungssteuerung und -kontrolle der Vorrang gegeben wird. Ihr wird eine größere Bedeutung als der AC beigemessen, da AC nur bei laufender Maschine, DNC aber über die Gesamtzeit Nutzen bringt.

Der Nutzen der DNC läßt sich wie folgt zusammenfassen [5.8]:

- Verwaltung und Pflege der Steuerdaten mit großer Sicherheit
- schneller Zugriff zu Steuerprogrammen, erhöhte Verfügbarkeit über alle Programme durch Wegfall der manuellen Archivierung
- Modifikationsmöglichkeit für Steuerdaten (Maßstabsumrechnung, Wiederholung usw.)
- Korrekturmöglichkeit für die Steuerdaten durch jederzeitige Mensch-Maschine-Beziehung (Herstellung eines Werkstückprogramms mittels Rechnerlaufs)
- Testen und Optimieren der Steuerprogramme, leichte Fehlerbeseitigung
- Wegfall des Datenzwischenträgers Lochstreifen
- Steigerung der Flexibilität des Fertigungsprozesses
- Erweiterungs- und Anpassungsfähigkeit, Kombination NCM und konventionelle Werkzeugmaschine
- Einbeziehung von Verkettungs-, Beschickungs- und Transporteinrichtungen in den automatischen Ablauf
- operative Fertigungsfeinplanung
- Erfassen und Protokollieren von statistischen (organisatorischen bzw. technologischen) Betriebsdaten (Prozeßanalyse) und Ableitung von logischen Entscheidungen zur besseren Maschinennutzung durch Fertigungssteuerung:
  - Grundzeit, Hilfszeit, Stillstandszeit
  - Störungen zur kurzfristigen Einleitung von Maßnahmen
  - Maschinenbelegung, Auslastung
  - Anzahl der gefertigten Werkstücke
  - Ausschuß
  - Arbeitsfortschritt

  Werkzeugstandzeit [9.7]
- Einsparung von Zwischen- und Fertigteillagern.

Voraussetzung ist hier mehr denn je eine zuverlässige NCM. Geht man zur automatischen Fertigung über, erhält man ein sog. großes System mit großen Investitionen. Seine Beherrschung ist weniger ein steuerungstechnisches als ein organisatorisches und programmtechnisches Problem.

10.5. Betriebsleitebene

Durch Einsatz einer großen EDVA für die Disposition des Gesamtbetriebs kann man zur Automatisierung und Integration des Prozesses von der Auftragsannahme, Bilanzierung der Kapazitäten, Materialdisposition und -verfolgung über Konstruktion, Technologie, Programmierung, Produktion bis zum Absatz einschließlich ökonomischer Überwachung der Reproduktion gelangen. Damit wird das integrierte Datenverarbeitungssystem erreicht, wozu dem menschlichen Genius in den nächsten Jahrzehnten noch große Aufgaben vorbehalten sind.

11. PROGRAMMIERUNG

11.1. Manuelle Programmierung

Unter Programmierung versteht man die Erarbeitung eines Datenträgers über Arbeitsfolge, geometrische und technologische Daten in maschinenlesbarem Code. Die Transformation der problemorientierten Informationen in maschinenorientierte erfolgt manuell (Bild 11.1) unter Verwendung von Tabellen, Rechenhilfen und Codetafeln (Vorcodiertabellen) und ist bei einfachen Werkstücken wirtschaftlich.

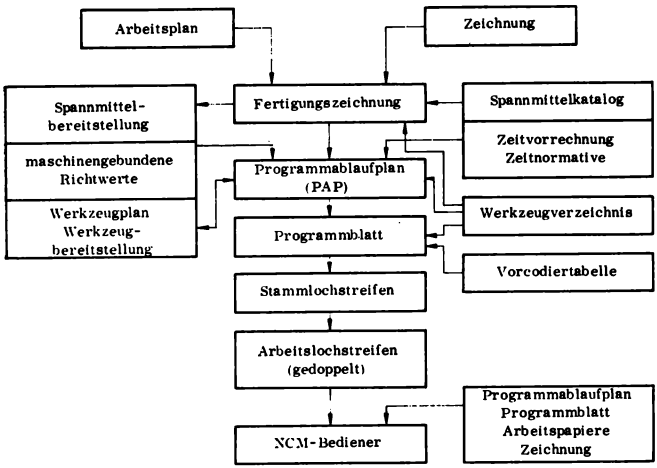


Bild 11.1. Arbeitsstufen der manuellen Programmierung [11.1]

Die Aufgabe wird vorwiegend der Konstruktionszeichnung entnommen. Vereinzelt dienen auch Meßmaschinen zur Abtastung von Modellen [11.1]. Für gerasterte Positionen (z. B. Leiterplatten) bewähren sich Digitalisiereinrichtungen. Die Fertigungszeichnung enthält alle in einer Aufspannung zu bearbeitenden Elemente mit Vorbearbeitungsmaßen, dem Koordinatensystem, Einspannungen, Bearbeitungszeichen u. ä. [11.2].

Im Programmablaufplan werden alle Weg- und Schalt-(technologischen)Informationen unverschlüsselt angegeben, wobei Vorschubgeschwindigkeiten, Richtungen, Quadranten, Drehbewegungen, Hilfsfunktionen, Drehzahlen usw. unter Verwendung von Zerspanungs- und Werkzeugdaten erkennbar werden.

Das Programmblatt ist die tabellarische Form des Programms. Die Vorcodiertabelle enthält die Zuordnung der möglichen Befehle unter Einhaltung der zugehörigen Standards, d. h. alle von der NC erkennbaren Daten. Den Codezahlen werden die realen Werte zugeordnet, so daß diese Tabelle das Vermögen der Maschine umfassend beschreibt.

Zur Umsetzung in den Stammlochstreifen und zu dessen Dopplung ist mindestens ein im NC-Code ausgebender Schreibautomat nötig. Zur Kontrolle wird das Programm in das Programmblatt rückgeschrieben, und es stehen dann handschriftliche, maschinengeschriebene und rückgeschriebene Information übereinander. Das Satzendezeichen ergibt sich durch den Zeilensprung mit Rücklauf. Zur Kontrolle der Programmierung empfiehlt sich das Aufzeichnen der geometrischen Werte auf einem Zeichentisch.

In [1.9] sind manuelle Programmierzeiten von 4,5′ bis 29,8′ je Maschinenstunde genannt. In [11.3] werden Programmierzeiten ausgewählter Beispiele manuell/maschinell gegenübergestellt:

104 Sätze/93 Anweisungen	234′/ 70′
364 Sätze/190 Anweisungen	1001′/168,5′
216 Sätze/67 Anweisungen	487′/ 85′.

Zum Verständnis der Handprogrammierung dient folgendes Beispiel (Bild 11.2), das für einen Teil des Dauertests einer NC ausgelegt ist. Es wurde technologisch nicht optimiert, um viele Funktionen anzusprechen.

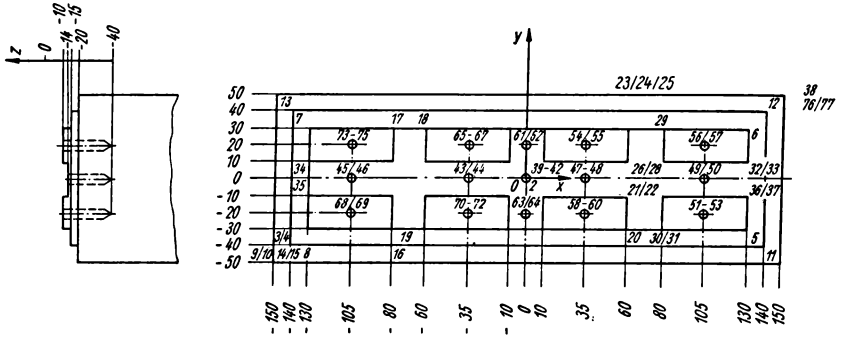


Bild 11.2. Werkstück für das Beispiel der Handprogrammierung

N001 G45 Z F999 S200 H0200 M03 M38
Satz 1; positive Korrektur von z; Korrekturschaltergruppe 02 (Längenkorrektur des Fräsers); Anfahren von $z = 0$; Eilgang; Spindeldrehung im Uhrzeigersinn (M03), Drehzahl 200, Drehzahlbereich 1 (M38); Absolutmaß liegt automatisch an

N002 G40 YX
Korrektur gelöscht; Nullpunkt $x = 0$, $y = 0$ anfahren

N003 G47 Y − 3000 X − 15000 H0101
negative Werkzeugkorrektur in beiden Achsen mit Schalter 01 (d.h. Fräserradius; hier $\leqq 10$ mm); verfahren nach $y = -30$ mm, $x = -150$ mm

N004 G45 G29 Z − 1500 H0200
Schleifefahren negativ (G29), d.h. Positionieren aus dem Negativen

N005 G27 X + 13000 F25 H0101
„Schleifefahren"; Fräsvorschub 1,8 · Grundvorschub (Schlüsselzahl 25) nach $x = +130$ mm positive Korrektur von Schalter 01

N006 Y + 3000
Korrektur aus Satz 5 beibehalten
N007 G47 X − 13000
Korrekturvorzeichen wechseln in „negativ"
N008 Y − 4000
N009 X − 15000 F999
Verlassen des Werkstücks im Eilgang
N010 G45 G29 Z − 2000 H0200
Zustellen mit Schleifefahren auf $z = -20$ mm mit Korrektur 02
N011 G27 X + 14000 F25 H0101
N012 Y + 4000
N013 G46 X − 14000
N014 Y − 4000
N015 Z − 1400 F999 H0200.
Es folgt die Bearbeitung der kreuzförmigen Flächen:
N016 G45 X − 8000 H0101
Eilgang steht noch an.
N017 Y + 3100 F25

⋮

N022 Z − 500 F999 H0200
Zurückziehen auf $z = -5$ mm außerhalb des Werkstücks.
Es folgt ein Test der Tischumschlagbearbeitung:
N023 G40 C + 50000
Tischdrehung um 50000 Impulse ≙ 180°
N024 G45 Y + 5000 X + 6000 H0304 M72 M01
Berechnung der y- und x-Koordinaten bei Tischlage 180°
(M72); Korrekturschalter 03 und 04; Wahlweise Halt
N025 Z − 1400 H0200 M70
Zustellen von z auf − 14 mm ohne Tischumschlagumrechnung
N026 Y + 1000 F25 H0400 M72
N027 Z − 500 F999 H0200 M70
N028 C
Tischlage 0°
N029 ···

⋮

N038 G40 G27 Y + 7000 X + 18000 M00
Werkzeugwechsel von Hand
N039 YX S41 M03 M39
Nullpunkt; 11,2 · Grunddrehzahl im Uhrzeigersinn, Drehzahlbereich 2
N040 G45 Z − 1300 H0500
Heranfahren bis 1 mm vor Oberkante Werkstück mit Bohrer-Längenkorrektur in Schaltergruppe 05, Eilgang steht noch an
N041 G04 Z − 4000 F15 E200
Bohren mit 0,56 · Grundvorschub; Verweilzeit 200 · 0,1 = 20 s; ohne Bearbeitungszyklus
N042 Z − 1300 F999.
Im Eilgang Rückzug bis $z = -13$ mm
N043 X − 3500
ohne Korrektur, da zur anderen Achsgruppe als z gehörend
N044 G81 G67 Z − 2600 I − 1400 F15 K + 1000.
Fester Zyklus „Eilgang − Vorschub − Eilrücklauf (programmierbar G67)"; Festwerttransformation $z = 0$ bis Werkstückoberkante − 14 mm (verfahren im Eilgang); Bohren einer Lochtiefe 26 mm; Rückzug + 10 mm über Werkstückoberkante

⋮

N048 G85 G27 Z − 2600 I − 1400 F15.
Fester Zyklus „Eilgang − Vorschub − Vorschubrücklauf bis Werkstückoberkante"

⋮

N051 G40 G80 Y − 2000 I F999
Werkzeuglängenkorrektur aufgehoben, da y zur Achsgruppe von z gehört; Festwerttransformation I = 0, womit in Satz 52 $z = -40$ mm wird

```
N052  G45  Z – 4000  F15
N053  Z – 900  F999
N054  G25  G28  G40  Y + 4000  X – 7000
      Kettenmaßeingabe! Schleifefahren um + 40 mm in y, d.h., nach y = + 20 mm um – 70 mm
      in x, d.h., nach x = + 35 mm (Testwerkstück! Nicht optimaler Weg!)
N055  G82  G27  G45  Z – 2100  I – 1000  F15  E200
      z = – 9 – 21 – 10 = – 40 mm
N056  G80  G28  X + 7000  F999
N057  G82  G27  Z  I – 1000  F15.
      Automatisch maximale Verweilzeit E999; z-Wert steht noch im Absolutwertspeicher an
      .
      .
      .
N077  M05  M02
```

11.2. Maschinelle Programmierung

11.2.1. Einführung

Die manuelle Programmierung mit hohem Routineanteil stellt eine sehr zeitaufwendige und fehleranfällige Tätigkeit dar (Errechnen und Auflisten von Koordinatenwerten, Berechnung von Koordinatentransformationen und Werkzeugwegen, die Ermittlung der Schnittwerte, Ablochen des Steuerprogramms).

Bei der maschinellen Programmierung wird diese Aufgabe einem Digitalrechner übertragen, wozu eine fertigungstechnische Programmiersprache (bzw. eine Eingabecodierung bei Darstellung in einem festen Format) und ein Übersetzerprogramm erforderlich sind.

Man unterscheidet

- rechner- und werkzeugmaschinenabhängige und
- universelle, unabhängige Programmiersprachen.

Erstere können auf Rechnern mit einer relativ kleinen Speicherkapazität verarbeitet werden, sind jedoch nicht universell anwendbar. Die universellen Programmiersprachen ermöglichen dagegen eine einheitliche Programmierung für eine große Anzahl von NCM. Von den universellen Programmiersprachen sind APT (USA) und daraus abgeleitete Entwicklungen, z. B. EXAPT, NEL-NC, IFAPT, MINIAPT, ADAPT usw., hervorzuheben [1.1] [11.4].

In der DDR steht mit AUTOTECH/SYMAP (Betreuung durch FZW, Karl-Marx-Stadt) ein komplexes System zur maschinellen Programmierung von NCM zur Verfügung. Die maschinelle Programmierung bietet im Vergleich zur manuellen folgende Vorteile:

- Erleichterung der Programmierarbeit
- Einsparung an Zeit und Arbeitskräften, je vielgestaltiger und umfangreicher die Aufgabe ist
- Kosteneinsparungen bei mittleren und komplizierten Programmieraufgaben
- Verringerung der Fehlerhäufigkeit
- maschinenunabhängige Programmierung bei Verwendung einer universellen fertigungstechnischen Programmiersprache.

Ab einem bestimmten Kompliziertheitsgrad ist die manuelle Programmierung praktisch nicht mehr durchführbar. Kleinrechner erweitern den wirtschaftlichen Einsatzbereich der maschinellen Programmierung (Bild 11.3).

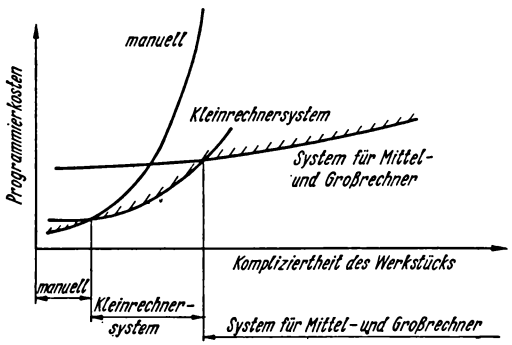


Bild 11.3. Wirtschaftliche Einsatzbereiche verschiedener Programmierverfahren

11.2.2. Ablauf der maschinellen Programmierung

Das vom Programmierer zu erstellende, gegenüber manueller Arbeitsweise einfachere Quellenprogramm (Bild 11.4) basiert auf den Regeln einer fertigungstechnischen Programmiersprache oder einer Eingabecodierung. Die Programmiersprache ermöglicht die Beschreibung der Werkstückgeometrie, der Werkzeuge, der Bearbeitungsfolgen u. ä. in einer konzentrierten, übersichtlichen Form, wobei der Werkstückprogrammierer keine komplizierten Berechnungen auszuführen hat.

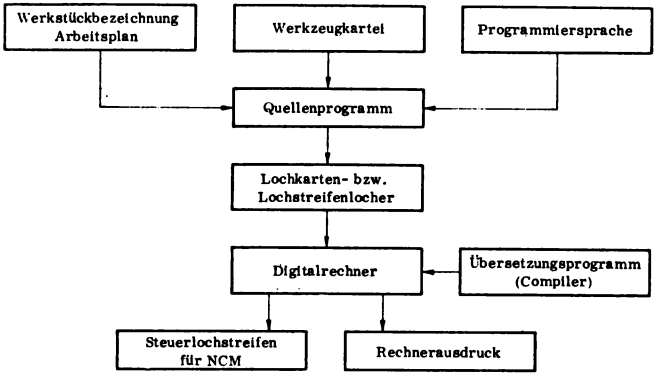


Bild 11.4. Ablauf der maschinellen Programmierung

Mit Hilfe eines Übersetzungsprogramms (Compiler) erstellt der Digitalrechner den NCM-gerechten Steuerlochstreifen und druckt Unterlagen zur Kontrolle des Steuerprogramms und zur Unterstützung der Produktionsorganisation aus. Das Übersetzungsprogramm bereitet dabei das Quellenprogramm in eine dem Digitalrechner verständliche Form auf (Bild 11.5). Mit einem Programmiersystem, d. h. mit einer fertigungstechnisch orientierten Programmiersprache und dem zuge-

hörigen Übersetzungsprogramm, soll eine möglichst große Anzahl von NC-Maschinen mit Steuerprogrammen versorgt werden.

Trotz Einhaltung der einschlägigen Standards variiert der Satzaufbau selbst innerhalb der Typenreihen von NCM erheblich (Anzahl und Dekadenumfang der Koordinaten, Anzahl und Codierung der Schaltinformationen, Vorschub- und Drehzahlbereich). Deshalb besteht ein Übersetzungsprogramm aus zwei Teilen, dem Verarbeitungsprogramm (Processor) und dem Anpassungsprogramm (Postprocessor).

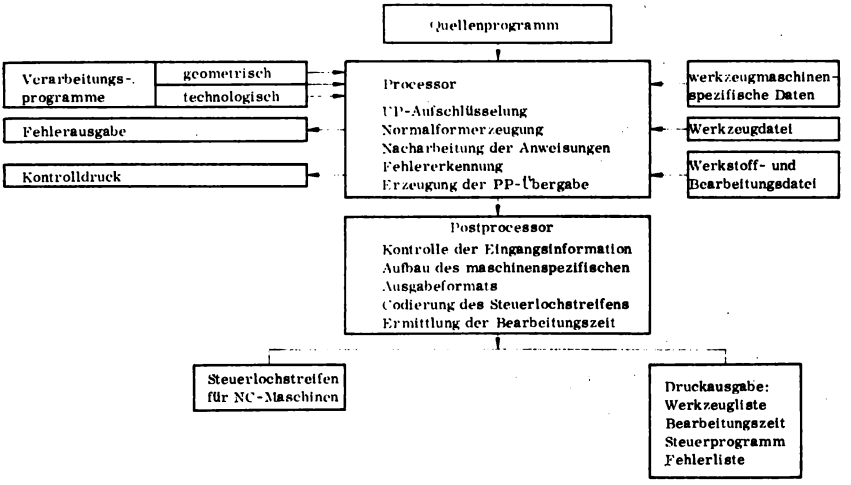


Bild 11.5. Verarbeitung des Quellenprogramms

Der Processor führt die geometrischen Berechnungen durch, verarbeitet technologische Informationen, bestimmt die Werkzeugbahn und gibt eine allgemeine Lösung des Bearbeitungsproblems. Im Postprocessor wird die allgemeine Lösung an die spezielle Kombination von Werkzeugmaschine und Steuerung angepaßt.

Programmiersysteme hoher Ausbaustufe, die viele technologische Entscheidungen automatisch ermitteln, benötigen für die Aufgabe des Processors zusätzliche Daten. Einfachere Programmiersysteme ohne diese lösen nur geometrische Aufgaben, und die technologischen Entscheidungen sind im Quellenprogramm vorzugeben.

11.2.3. AUTOTECH/SYMAP

11.2.3.1. *Allgemeine Charakteristik*

Die Möglichkeiten des Programmiersystems AUTOTECH/SYMAP können hier nur angedeutet werden. In seinem Rahmen entstanden sog. Komplexprogramme, d. h. Rechen- bzw. Übersetzungsprogramme, mit deren Hilfe jeweils eine Klasse von NC-Steuerungen (z. B. Punkt-Strecken-Steuerungen) für einen gewissen Fertigungskomplex programmiert werden kann. Sie ermöglichen die maschinelle

Programmierung von numerischen Punkt-, Strecken- und 2D- bzw. 2 1/2D-Bahnsteuerungen an

- Bohrmaschinen
- Lehrenbohrwerken
- Fräsmaschinen
- Bohr- und Fräswerken
- Bearbeitungszentren
- Drehmaschinen
- Schleifmaschinen
- Brennschneidmaschinen
- Meßmaschinen
- Zeichenmaschinen.

Die auf Mittel- und Großrechnern realisierten Komplexprogramme verarbeiten genau definierte Untermengen der fertigungstechnischen Programmiersprache SYMAP (Symbolsprache zur maschinellen Programmierung von NCM). Auf Kleinrechnern wird eine vereinfachte Programmiersprache oder werden Eingabecodierungen für spezielle Aufgaben verwendet.

11.2.3.2. *Programmiersprache SYMAP*

Das Vokabular ist verfahrensbezogen und basiert auf der deutschen Sprache; die SYMAP-Quellenprogramme können wahlweise in freiem Format oder in ein SYMAP-Formular geschrieben werden (Bild 11.6).

SYMAP-Formular:

Lfd. Nr.	Befehls-wort	Var.	Definit.-Wort	Parameter 1	2	3	4	5	6
25	TECH	T8	BOSPIR	D, 12	AD, 15	W, W18			

Freies Format:

25, TECH, T8, BOSPIR, D, 12, AD, 15, W, W18

Bild 11.6. Darstellungsmöglichkeit einer SYMAP-Anweisung

Mit Hilfe von Definitionswörtern und den zugehörigen Parametern lassen sich u. a. geometrische, technologische oder arithmetische Elemente definieren. Diese erhalten eine Variablenbezeichnung, über die sie beliebig oft aufrufbar sind. Es gibt 19 verschiedene Typen von Variablen (z. B. Punkte *P1, P2, . . .*, Geraden *G1, G2, . . .*, technologische Operationen *T1, T2, . . .*). Befehlswörter steuern die Reihenfolge und die Art ihrer Verarbeitung. Als Parameter können Zahlen, Variable, Modifikations- und Markierungswörter in Verbindung mit einer Zahl oder einer Variablen stehen.

Zur geometrischen Beschreibung dienen Definitionen für Koordinatensysteme, Punkte, Punktfolgen bzw. Punktmuster, Geraden, achsparallele Streckenzüge, Kreise, Vektoren und Formelemente. Die Programmiersprache SYMAP er-

möglicht die Vorgabe spezifischer technologischer Operationen für Bohren, Fräsen, Drehen, Messen, Schleifen.

Ferner können Werkzeuge, Werkstückkonturen und Werkzeugwege, Werkzeugwechselpositionen, Sicherheitsabstände, Bearbeitungseinheiten der Werkzeugmaschinen, Verknüpfungen von technologischen Operationen mit Bearbeitungsstellen, arithmetische Ausdrücke, Texte usw. beschrieben oder aufgerufen werden. Nähere Informationen siehe [11.2] [11.5] bis [11.14].

Beispiel Bild 11.7, links, Kreisschnittpunkt:

DEF, P3, PKK, K9, K10, YKL;	Anweisung SYMAP
P3 = POINT/YSMALL, INTOF, K9, K10	Anweisung APT

Beispiel Bild 11.7, rechts, Tangente:

DEF, G3, GKK, K1, LKS, K2, RTS;	Anweisung SYMAP
G3 = LINE/LEFT, TANTO, K1, RIGHT, TANTO, K2	Anweisung APT

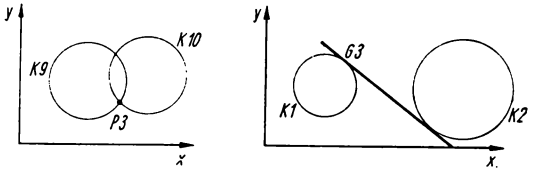


Bild 11.7. Beispiele

11.2.3.3. *Komplexprogramme für Mittel- und Großrechner*

Die meisten Komplexprogramme für Mittel- und Großrechner weisen einen hohen Programmierkomfort und eine verhältnismäßig hohe technologische Ausbaustufe auf.

Im Komplexprogramm AUTOTECH/SYMAP-KOPGK [11.9] können Fräs-, Profilschleif-, Brennschneid- und Zeichenmaschinen mit einer 2D- oder $2^1/_2$D-Bahnsteuerung programmiert werden. Programmierbar sind Werkstücke, deren Kontur mit Hilfe von Punkten (7 Definitionen), Geraden (9 Definitionen) und Kreisen (17 Definitionen) zu beschreiben ist.

Die geometrischen Definitionen werden durch Bewegungs- und andere auszuführende Anweisungen in Kraft gesetzt. Hieraus wird die Werkzeugbahn in Form von Positionier-, Anfahr-, Arbeits- und Auslaufwegen bezüglich der Werkstückkontur ermittelt. Technologische Vorgaben beschränken sich auf vorcodierte Maschinenbefehle.

Im Komplexprogramm KOB2 [11.10] wurde KOPGK um Punktfolgen (6 Definitionen), Instruktionsverbände und technologische Anweisungen (4 Definitionen) erweitert. Instruktionsverbände bieten Programmiererleichterungen bei Werkstücken, die mehrere gleichartige Konturabschnitte in geänderter Lage enthalten.

Das Komplexprogramm BOFR1 [11.11] wurde für Bohrmaschinen, Fräsmaschinen und Bearbeitungszentren mit Punkt-Strecken-Steuerung geschaffen. Zur Verfügung stehen Definitionen für
Punkte (10), Punktfolgen (14), achsparallele Streckenzüge (9), Bohr- (13) und Fräsoperationen (4). Ermittelt werden die Werkzeugwege, die Schnittaufteilung, die Schnittwerte und die Werkzeuge aus einer universellen Werkzeugdatei.

Das Komplexprogramm BO2 [11.12] ermöglicht die maschinelle Programmierung von NC-Bohrmaschinen und Bohrbearbeitungen auf Bearbeitungszentren, wozu 12 Definitionen für Punkte, 14 für Punktfolgen und 13 für Bohroperationen dienen. Die Werkzeugwege und die Schnittwerte werden automatisch aus betriebsspezifischen Werkzeugdateien bestimmt.

Mit AUTOTECH/SYMAP-FR2 [11.12] sind Fräsmaschinen und Bearbeitungszentren mit Punkt-Strecken-Steuerungen programmierbar. Neben den 7 Definitionen für Fräsoperationen sind die Punkt- und Punktfolgedefinitionen des Komplexprogramms B 02 benutzbar. Die Schnittaufteilung und die Werkzeugwege werden automatisch ermittelt. BO2 und FR2 sind zu B02FR2 kombinierbar [11.12].

Das Komplexprogramm Mini-SYMAP [11.13] stellt eine Minimallösung für NC-Bohr- und Fräsmaschinen und mit Einschränkungen auch für Bearbeitungszentren auf der EDVA R 300 dar. Es erhält u. a. nur 7 Definitionen für Punkte und Punktfolgen, 8 für einfache Bohroperationen und 4 für einfache Fräsoperationen. Für das Fräsen wird die Werkzeugmittelpunktsbahn mit den Definitionen für Punkte und Punktfolgen programmiert. Gleichartige Programmabschnitte können als Instruktionsverband mehrfach aufgerufen werden.

Das Komplexprogramm SYMAP-ME 1 [11.18] ist auf die Programmierung von NC-Meßmaschinen in Maschinensystemen zugeschnitten, kann aber auch für einzelne NC-Meßmaschinen angepaßt werden.

Maschinell programmierbar ist die Antastung (4 Operationen) prismatischer Werkstücke mit achsparallelliegenden Bohrungen und Flächen in Verbindung mit 11 Punkt- und 14 Punktfolgedefinitionen sowie die Vorgabe von Anweisungen zur Steuerung der Meßauswertung (14 Definitionen). Ermittelt werden die Wege des Meßtasters.

Das Komplexprogramm DR 1 [11.2] [11.4] dient zur Programmierung von streckengesteuerten Drehmaschinen mit 14 Definitionen für Dreh-, 5 für Bohr- und 5 für Gewindebearbeitungsoperationen. Das Komplexprogramm ermittelt die Werkzeugwege, die Schnittaufteilung für Längs- und Plandrehen sowie für Gewindeschneiden mit Drehmeißel sowie Schnittwerte und Zeiten.

11.2.3.4. *Komplexprogramme für Kleinrechner*

Kleinrechner schließen die Lücke zwischen manueller und maschineller Programmierung auf großen Rechnern. Die Quellenprogramme können schnell verarbeitet werden, wenn der Kleinrechner im NC-Anwenderbetrieb durch den Werkstückprogrammierer direkt genutzt werden kann.

Die relativ kleine Speicherkapazität bedingt, daß die Komplexprogramme entweder auf ein enges Typenteilesortiment beschränkt sind oder Abstriche hinsichtlich des Programmierkomforts und der technologischen Ausbaustufe aufweisen. Dennoch wird durch den Einsatz von Kleinrechnern für viele Anwendungsfälle eine beachtliche Zeiteinsparung bis zu 80% gegenüber der manuellen Arbeitsweise erreicht.

Das Komplexprogramm BOFR 3 [11.15] ermöglicht die maschinelle Programmierung von punkt-streckengesteuerten Bohr- und Fräsmaschinen und mit Einschränkungen auch von Bearbeitungszentren auf dem Kleinrechner KRS 4200. Zur Verfügung stehen u. a. Anweisungen für
Bohroperationen (12), Fräsoperationen (2), Punkte und Punktfolgen (4) und Streckenzüge (4).

Die Werkzeugwege, die Schnittwerte für Bohroperationen und die Zeitberechnung werden automatisch ermittelt.

Bei diesem Komplexprogramm wird eine stark vereinfachte Programmiersprache mit etwa 50 Wörtern verwendet (Eingabeformular Bild 11.8). Nur die Werkzeugdefinitionen bilden Variable, die in nachfolgenden Anweisungen als Parameter benutzt werden können.

Lfd. Nr.	Programmwort	Parameter							
		1	2	3	4	5	6	7	8
25	WEWEX	W 5	W 6						
26	BOSPIR	TD, 4⌀							
27	WEWEX	W 6	W 1						
28	REIBEN	TD, 4⌀							
29	QXYI	16⌀	3⌀	1⌀	8⌀	−2⌀	−36		

Bild 11.8. Eingabeformular mit Programmausschnitt bei AUTOTECH/SYMAP-BOFR 3

AUTOTECH/SYMAP-DR 4 [11.16] stellt eine analog einfache Variante für NC-Drehmaschinen gleicher Struktur wie BOFR 3 dar. Für Drehmaschinen mit Bahnsteuerung ist ein Ergänzungsprogramm für Konturberechnungen vorgesehen.

Das Komplexprogramm KURVENSCHEIBE [11.17] dient zur maschinellen Programmierung von Kurvenscheiben, die auf Fräs- oder Profilschleifmaschinen mit 2D-Bahnsteuerung zu bearbeiten sind.

Das Komplexprogramm PUNKTFOLGE [11.17] ermöglicht die Programmierung von ebenen (2D) Werkstückkonturen, die als eine glatte Kurve über eine Punktfolge (in kartesischen oder in Polarkoordinaten) zu bilden sind.

11.2.4. Entwicklungstendenzen in der maschinellen Programmierung

Die stürmische, teilweise widersprüchliche Entwicklung von NC-Programmiersystemen wird in folgenden Tendenzen deutlich:

- Vereinheitlichung der APT-ähnlichen Programmiersprachen im Rahmen der ISO-Standardisierung
- Entwicklung von Programmiersystemen mit sehr hohem Automatisierungsgrad für Familien von Typenteilen (Gruppentechnologie)

  Bei der Programmierung werden lediglich die geometrischen Daten unter Verwendung einer rein numerischen Eingabecodierung in ein Eingabeformular übertragen. Dieser Entwicklungsweg wird beim AUTOPROG-System (ČSSR) [11.19] beschritten.
- Entwicklung einer universellen fertigungstechnologischen Programmiersprache, die eine verbesserte Geometriebeschreibung auf der Basis von Formelementen (z. B. Zylinder, Kegel, Nut usw.) bietet

Mit dieser Programmiersprache sollen alle aus der Konstruktionszeichnung zu entnehmenden Daten, wie Toleranzen, Passungen, Form- und Lageabweichungen usw., darstellbar sein.

- Entwicklung von Programmiersystemen für Kleinrechner
- Erhöhung des Automatisierungsgrades bei universellen Programmiersystemen durch Anwendung von Datenbanken mit allgemeingültigen und betriebsspezifischen Daten
- Verbesserung des Zugriffs zum Großrechner mit Hilfe der Datenfernübertragung und dem Ausbau von Dialogsystemen
- Entwicklung modular aufgebauter Programmiersysteme, die entsprechend den spezifischen Forderungen des Anwenders zusammengestellt werden können [11.20].

NC werden zukünftig auch Bauelemente hoher Integration enthalten, wobei weniger die Volumeneinsparung als fertigungstechnische und ökonomische Gesichtspunkte sowie die zu erwartende Zuverlässigkeit ausschlaggebend sind. Interessant dürfte die MOS-Technik (englisch metal oxid silicium) für Großintegration (Speicher, Kundenschaltungen) werden, weil man dabei deren Vorteile voll ausnutzen kann:

- extrem niedrige Verlustleistung → hohe Packungsdichte (1000 MOSFET/mm²) möglich, Ansteuerung fast leistungslos
- gleiche Technologie für Transistor, Diode, Kondensator und Widerstand (Senkung der Arbeitsgänge auf 25%, nur ein Dotiermaterial und eine Diffusion nötig).

Im Vergleich zur TTL-Technik ergeben sich weitere Veränderungen [12.1] [12.2]:

- MOS-Elemente sind direkt als Widerstand verwendbar (Drain-Gate-Verbindung, Steilheit $\mu A/V \sim 1/R$)
- Kondensatoren sind aus Gate und Grundmaterial zu gewinnen
- R_I ist hoch ($> 10^{12}\ \Omega$), wodurch direkte Kopplung ohne Basiswiderstand möglich wird
- galvanisch entkoppelt, kaum Rückwirkung Drain-Gate
- spannungsgesteuert, dadurch hohes fan in und fan out
- niedrigere Taktfrequenzen (500 ... 2000 kHz je nach Kettenlänge), Schaltgeschwindigkeit > 40 ns
- höhere statische Störsicherheit, niedrigere dynamische Störsicherheit
- höhere Betriebsspannung wegen niedrigerer Kanalleitfähigkeit ($R > 500\ \Omega$) bei Hochvolttechnik;
  bei Niedervolttechnik (5; 13 V) kann leistungsarme TTL angeschlossen werden
- dynamische Schaltung mit kurzzeitiger Ladungsspeicherung auf der Gateelektrode möglich, wodurch Anzahl der Elemente extrem gesenkt werden kann
- geringerer Ausgangsstrom ($< 10^{-12}$ A) wegen niedriger Kanalleitfähigkeit ($R_{\text{offen}} \approx 10^3\ \Omega$, $R_{\text{geschl}} \approx 10^2 \ldots 10^3\ \Omega$)
- niedrige Nullpunkdrift
- geringere Temperaturabhängigkeit
- hoher Rauschpegel
- geringere Kosten ($< 1/5$ je Funktion).

Aus diesen Eigenschaften kann der Einsatz besonders bei Festwertspeichern (ROM, englisch read only memory); Schreib-Lese-Speichern (RAM, englisch random excess memory) und Kundenwunschschaltungen in LSI vorausgesagt werden.

Die Einführung war durch die Beherrschung der Technologie der Feldeffekttransistoren (FET) gegeben. Der unipolare Leistungsmechanismus der MOSFET benutzt nur die Majoritätsträger, wobei die Anzahl der Ladungsträger durch ein elektrisches Querfeld gesteuert wird. Beim p-Kanal-Typ wird durch eine negative Spannung U_{GS} (Schwellspannung 2 15 V) am Gate-(Tor-)Steueranschluß ($Si\,O_2$) zwischen der Quelle (Source) und Senke (Drain) ein leitender Kanal (Anreicherungstyp) dadurch gebildet, daß ein elektronenverarmtes Gebiet an der Grenzschicht Gate – Grundmaterial ($Si\,O_2$/Si) entsteht.

Beim Verarmungstyp ist der p-Kanal bei einer Gate-Spannung von 0 V vorhanden und wird durch eine positive Spannung hochohmiger (umgekehrte Vorzeichen beim n-Kanaltyp).

Die Schaltgeschwindigkeit wird durch die Fehlanpassung des hochohmigen Ausgangs zur niederohmigen Leitung negativ beeinflußt, innerhalb des Schaltkreises kann sie trotzdem hoch sein (Speicherzykluszeit 2 µs statisch, 0,5 µs dynamisch bei 10-kHz-Taktung).

Geringere Schaltzeiten erreicht man mit komplementären Typen (CMOS), die allerdings p- und n-Dotierung erfordern.

Bei der Großintegration (LSI) unterscheidet man die Einzelchip- (englisch single chip, monolithische) Ausführung mit einem sehr komplizierten technologischen Prozeß.

Mit Multichiptechnik ist man flexibler, hat aber auch die Nachteile größeren Volumens, erhöhter Anzahl Fertigungsschritte und komplizierterer Verbindungstechnik in Kauf zu nehmen. Hybride Technik verbindet Chips mit Dünnfilmkomponenten oder besteht nur monobrid aus mehreren Halbleiterchips.

Mit Großintegration ist steigende Zuverlässigkeit zu erreichen, als Packungsdichte werden etwa 4500 MOSFET/Schaltung genannt [12.2].

Von Firma Fairchild wird ein anschaulicher Vergleich zwischen TTL und hybridem Mikrosystem für eine Multiplex-Anlage ausgegeben:

Bauelemente	100 TTL	5 MSI/LSI
MTBF	$0{,}05 \cdot 10^6$ h	$5 \cdot 10^6$ h
Größe	4 KBG	1 Gehäuse
Lötstellen	1500	30
Bondierungen	130	1400
Masse	1000 g	10 g.

Als Kern der Zentraleinheit einer NC bzw. CNC werden sich sehr schnell Mikroprozessoren einführen, deren Schnelligkeit von der physikalischen Grundstruktur abhängt.

Auch Dickschichtmodultechnik ist wegen ihrer Anpassungsfähigkeit und ökonomischen Losgröße von 100 bis 10000 zukunftsträchtig, Packungsdichte 25 Bauelemente.

In Anwendung der Optoelektronik [12.3] werden 7-Segment-Anzeigen entwikkelt, bei ednen lichtemittierende (Luminiszenz-)Dioden aus GaAs eingesetzt sind. Das Licht entsteht in der Sperrschicht beim Anlegen von Spannung. Sie sind von 5 V direkt anzusteuern und erreichen eine Ziffernhöhe von 3 bis 7 mm, während die Lesbarkeit auf Grund der Ziffernform eine Frage der Gewöhnung ist. Für Flüssigkristalle ist der Einsatz wegen der nicht vorherzusagenden Beleuchtung fragwürdig.

Optokoppler werden die galvanische Trennung garantieren.

Zu erwarten ist der Wegfall kontaktbehafteter Schalt- und Steuergeräte, wodurch Prellfreiheit, Zuverlässigkeit, hohe Schalthäufigkeit, Lebensdauer und Unempfindlichkeit gegen Umwelteinflüsse gelöst werden. Als physikalisches Prinzip ist mit Erfolg der Halleffekt [12.4] (Feldplatte) angewendet worden, die im Bedienelement integrierte Triggerschaltung liefert TTL-Pegel.

Thyristoren werden in Zukunft auch für Schaltaufgaben anstelle hochbelasteter Schütze eingesetzt. Dazu sind in Ws-Kreisen antiparallelgeschaltete Thyristoren oder 4 Gleichrichter und 1 Thyristor in Brückenschaltung oder 1 Triac (Symistor) nötig [12.5]. Unter einem Triac versteht man einen Vollweg-Thyristor, der in beiden Richtungen betreibbar ist. Nachteilig sind das Fehlen der galvanischen Trennung, die Überlastempfindlichkeit, die Durchlaßverluste und der hohe Preis.

Zur Steuerungstechnik nur noch wenige Worte [5.1]. Der Prozeßrechnereinsatz ist steigend und dringt weiter in die diskontinuierliche Fertigung ein [12.6] [12.7]. Er löst jedoch im nächsten Jahrzehnt die bewährte konventionelle NC nicht ab, vielmehr steigt der Bedarf an einfachen Lösungen stärker als der komplizierter NC. Besonders wird die NC-gesteuerte Drehmaschine vorrangig eingesetzt.

Da Großrechner in Verbindung mit ökonomischen Aufgaben vertretbar sind, hat sich der Drang zum Kleinrechner sehr verstärkt [8.29] [12.6]. Die Rechnergröße wird direkt dem Prozeß angepaßt. Durchgängige Steuerungshierarchien werden auch im nächsten Jahrzehnt nur Einzellösungen bleiben. Der Kleinrechner wird voraussichtlich vorrangig für CNC-Einzelmaschinensteuerung, danach für CNC-Mehrmaschinensteuerung und Fertigungssteuerung eingesetzt.

Der Vereinheitlichung von Anschlußbildern ist verstärkte Aufmerksamkeit zu schenken.

Graphische Displays werden im rechnergestützten Entwurf und zur rationellen Kontrolle von Quellenprogrammen eingesetzt [12.7].

Der Einsatz der Rechentechnik zur Anpaßsteuerung an die NCM wird sich verstärkt einführen. Geregelte Antriebe werden neben elektrischen Hochleistungsschrittmotoren verwendet. Ein Übergang zum Lageregelkreis – statt Abschaltkreis – wird eintreten.

Sicher geht man nicht fehl in der Prognose eines weiteren Ansteigens der numerischen Steuerungstechnik unter Nutzung moderner Bauelemente.

13. ANHANG

13.1. Formelzeichen und Abkürzungen

a	Ziffer eines Zahlensystems
$\bar{a}$	konegative Zahl, negierte Variable
B	Basis eines Zahlensystems
C	Kapazität
d	Abstand, Hammingabstand, Differenz
d_n	Differenz im Schritt n
D_{k+l}	Entscheidungsoperator bei Interpolation
D_{xk}, D_{yl}	desgl. beim Schritt in x-(y-)Richtung
f	Frequenz
f_0	Eigenfrequenz
f_I	Rechenfrequenz des Interpolators
f_l	Teilungsfehler eines Längenmaßstabs
f_T	Taktfrequenz, Pulsfrequenz
F	Fehler
F	Ausfallwahrscheinlichkeit
F	Festwert
G	Menge der ganzen Zahlen
H	mittlerer Informationsgehalt (Entropie)
H_0	Entscheidungsgehalt
i_K	Korrekturimpuls
i_Z	Zählimpuls
I_a	Anodenstrom
I_A	Ankerstrom
J	Massenträgheitsmoment
k	Kopplungsfaktor
k	Steife
k_q	Ungleichförmigkeitsgrad
k_v	Geschwindigkeitsverstärkung
K_I	Überlastfaktor des Stroms
$K_x(n)$	Vertrauenskoeffizient
$K6$	6-Korrektur
m	Richtungsfaktor
m_n	Mangel im Schritt n
M	Moment
M_D	Dauermoment
n	Schrittzahl bei Interpolation
N	Menge der natürlichen Zahlen
N	Lastfaktor
p	Produkt

p	Ausbeute im Produktionsprozeß
p	Druck
$p\,(x_i)$	Wahrscheinlichkeit für das Ereignis x_i
P_C	Verlustleistung des Transistors
P_V	Verlustleistung allgemein
q	Quotient
$q\,(t)$	Ausfallquote
$r\,(t)$	residuale Lebenserwartung
R	Redundanz
R	Radius
$R\,(t)$	Überlebenswahrscheinlichkeit
R_x, R_y	Radiusvektor in Achsrichtung
s_n	Summe im Schritt n
S	Stellbereich
S_H	Anstellvorschub bei AC
S_0	programmierter Vorschub bei AC
t_a	Anstiegszeit
t_{an}	Anregelzeit
t_{aus}	Ausregelzeit
t_p	Positionierzeit
t_{pR}	Rücksetzimpulsdauer
t_{pS}	Setzimpulsdauer
t_{pT}	Taktimpulsdauer, Eingangsvoreinstellzeit
t_{rev}	Reversierzeit
t_{tot}	Totzeit
t_A	Additionszeit
t_A	Ausfalldauer
t_B	Betriebszeit
t_H	Hochlaufzeit
t_{Pr}	Multiplikationszeit
t_T	Taktzeit
t_{TZ}	Taktzykluszeit bei Bahnsteuerung
t_V	Verschiebungszeit, Verzögerungszeit bzw. Laufzeit auf einer Leitung
t_W	Wartezeit
t_Z	Zykluszeit
T	Zeitkonstante
T	Interpolationszeit
T_D	Signalverzögerungszeit
T_T	Flankenzeit des Prüfgenerators für TTL
$\ddot{u}$	Übertrag
U_F	Fehlerspannung
U_{KK}	Spannung zwischen den Katoden
U_S	Speisespannung
U_S	Schleusenspannung
U_{St}	Störspannung
U_Z	Zenerspannung
v_t	Tangentialgeschwindigkeit, Bahngeschwindigkeit
V	Verfügbarkeit
W	Gewindesteigung
$\bar{x}$	negierte Variable

x_i	Koordinate des Punktes P_i
x_i	Ereignis
x_m	Abszisse des Kreismittelpunktes
x'	Achsrichtung bei bewegtem Werkstück
x_i'	transformierte Koordinate von P_i
x_F	Abszisse des Festwertes
y_i	Koordinate des Punktes P_i
y_m	Ordinate des Kreismittelpunktes
y'	Achsrichtung bei bewegtem Werkstück
y_i'	transformierte Koordinate von P_i
y_F	Ordinate des Festwertes
z	Stufenzahl
z^j	Menge der Zustände beim Takt j
z'	Achsrichtung bei bewegtem Werkstück
Z_0	Wellenwiderstand
$\alpha, \beta, \gamma, \delta$	Winkel
δ	Gleichförmigkeitsgrad
ε	Winkelbeschleunigung
ε	Dielektrizitätskonstante
η	Wirkungsgrad
ϑ	Temperatur
λ	Wellenlänge
$\lambda\,(t)$	Ausfallrate
τ	Rasterteilung
τ	Periodendauer
τ	Parameter
φ	Stufensprung
φ	Phasenwinkel
ω	Winkelgeschwindigkeit
ω	Kreisfrequenz
ω	Bandbreite
Δ	Differenz
Φ	magnetischer Fluß

Indices

a	Umgebung (ambient)
D	dynamischer Wert
e	Endpunkt
H	Hochpegel
i	Zählindex
I	Eingang (input)
L	Niedrigpegel (low)
m	Mittelpunkt
N	Nennwert
O	Ausgang (output)
S	Signal
S	Speisung (source)
S	Lagerung (storage)
set up	Einstellung, Vorbereitung

T	Träger
0	Ausgangs-(Anfangs-)wert
0	Leerlauf

Häufig verwendete Abkürzungen

AC	adaptives Regelungssystem [(self) adaptive control]
ACC	Grenzwert- oder Auslastungsregelung (adaptive control constraint)
ACO	selbstoptimierende Regelung (adaptive control optimization)
ASE	Ansteuereinheit
BCD	binär codierte Dezimale
BAZ	Bearbeitungszyklus
BTR	direkter Rechneranschluß (behind the tape reader)
CNC	rechnerintegrierte Arbeitsmaschinensteuerung (computer-, computerized numerical control)
DNC	direct numerical control
ETZ	Eingabetaktzyklus
FET	Feldeffekttransistor
FF	Flipflop, Kippstufe
FT	Festwerttransformation
IC	integrierter Schaltkreis (integrated circuit)
JK-FF	Master-Slave-Flipflop (Speicher)
KBG	Kartenbaugruppe
LE	Lasteinheit
Lü	Leseübernahmezyklus
LSI	Großintegration (large scale integration)
MOS	metal oxid silicium
MSI	mittlere Integration (medium scale integration)
NC	numerische Steuerung (numerical control)
NCM	numerisch gesteuerte Maschine
NCP	NC-spezifische Rechnerperipherie
PAP	Programmablaufplan
PLE	programmierbare Logikeinheit
PSU	Parallel-Serien-Umsetzer
RAM	Schreib-Lese-Speicher (random access memory)
RE	Recheneinheit
ROM	Nur-Lesespeicher (read only memory)
SI	Standard-Interface; Anschlußstandard
SSI	Einfachintegration (small scale integration)
STE	Rechnerperipherie; Steuerung technologischer Einheiten
Tz	Taktzyklus
ÜSG	Rechnerperipherie; Überwachungs- und Steuergeräte

13.2. Standards

Standard	Ausgabe	Titel
TGL 9198	7.70	Umgebungseinflüsse auf technische Erzeugnisse; Klimaeinflußgrößen; Begriffe
TGL 9199/01, dazu 1. Änderungsblatt	7.70	–; Klimaklassifizierung; Klimatische Einteilung der Erde für technische Zwecke, Umgebungseinflüsse; Klassifizierung
TGL 9199/03	3.73	–; –; Korrosionsbeanspruchungsklassen für Erzeugnisse der Elektrotechnik, Elektronik und des wissenschaftlichen Gerätebaus
TGL 9199/04	7.72 Entw.	–; Klassifizierung der Umgebungsbedingungen; Klimatische Bedingungen bei Transport und Lagerung
TGL 9200/01	7.70	Umgebungseinflüsse; Klassifizierung von Erzeugnissen, Ausführungsklassen
TGL 9200/02	7.70	–; –, Prüfklassen
TGL 9200/03	9.71	–; –, Einsatzklassen
TGL 9200/04	7.72 Entw.	–; Vorzugsklassifizierung
TGL 9219	11.67	Klimaschutz; Forderungen und Maßnahmen zur Vermeidung von Schäden der Umwelteinflüsse
TGL 11651/01	9.71	Gedruckte Schaltungstechnik; Basismaterial; kupferkaschierter Schichtpreßstoff, Begriffe, Typen, Kennwerte, Abmessungen
TGL 11651/02	9.71	–; –; Prüfverfahren
TGL 12188	4.64	Vorschübe für Werkzeugmaschinen
TGL 14091/02	12.67	BMSR-Technik; Symbole und Kennzeichen, Darstellung in Bauglied- und Signalflußplänen
TGL 14591	12.63	Steuerungs- und Regelungstechnik; Begriffe und Benennungen
TGL 15040	3.65	Begriffe der Längenprüftechnik
TGL 15041/01	1.64	Klasseneinteilung für Längenmeßgeräte; Übersicht
TGL 15041/02	1.64	–; Maße mit Teilung
TGL 15165/01	3.66	Elektrotechnik; Schutzgrade für Berührungs-, Fremdkörper- und Wasserschutz
TGL 15165/03	12.71	–; –; Symbole
TGL 16627	6.63	Lastdrehzahlen für Werkzeugmaschinen, Grundwerte – Grenzwerte – Übersetzungen
TGL 20675/01	11.69	Rotierende elektrische Maschinen; Begriffe
TGL 20675/02	11.69	–; Technische Forderungen
TGL 20885/01	12.71	Funk-Entstörung; Begriffe
TGL 20885/02	12.71	–; Funkstörmeßgerät, Kennwerte, Prüfbedingungen
TGL 20885/03	12.71	–; Vorentstörung funkstörender Erzeugnisse, Meßverfahren, Betriebsbedingungen für Messungen
TGL 20885/04	12.71	–; –, –, Auswertung der Meßergebnisse
TGL 20885/05	12.71	–; –, Grenzwerte
TGL 21366	1.66	Elektrotechnik; Schutzklassen

Standard	Ausgabe	Titel
TGL 22451/01	10.67	Informationsverarbeitung; Datenfluß- und Programmablaufpläne, Sinnbilder
TGL 23207/01	10.73 Entw.	–; Code; 7-Bit-Code
TGL 23207/02	10.73 Entw.	–; 7-Bit-Code, Darstellung auf Lochbändern
TGL 24319	12.70	Werkzeugmaschinen, Koordinatenachsen und Bewegungseinrichtungen
TGL 24569	2.72	Mikroelektronik; Halbleiterblocktechnik, Bezeichnungssystem
TGL 24951	2.72	–; monolithische bipolare Schaltkreise mit vorgegebener Zuverlässigkeit, Integrationsgrad I, Allgemeine technische Forderungen, Prüfungen, Lieferung
TGL 25016/01	10.72	Gedruckte Schaltungstechnik; Ein- und Zweiebenenschaltungen, Konstruktionsrichtlinie
TGL 25016/02	10.72	–; –, Technische Forderungen
TGL 25016/03	10.72	–; –, Prüfung
TGL 25016/04	10.72	–; –, Lieferung
TGL 25017/01	12.72	Gedruckte Schaltungstechnik; Mehrlagenschaltungen; Konstruktionsrichtlinie
TGL 25017/02	11.73	–; –, Technische Forderungen
TGL 25017/03	11.73	–; –, Prüfung
TGL 25017/04	11.73	–; –, Lieferung
TGL 25017/05	11.73	–; –, Mehrlagenleiterplatte, Montagevorschriften
TGL 25017/06	11.73	–; –, Kontrolliste, Prüflochband
TGL 25017/07	11.73	–; –, Bohrlochband
TGL 25060	12.71	Elektrotechnik, Elektronik; Einheitliches Gefäßsystem EGS, Standards, Ordnungssystem, Systemstruktur, Übersicht
TGL 25061/01 bis /04	4.72 7.73	–; –; Begriffe/Allgemeine technische Forderungen/ Typprüfung/Lieferung, Verpackung, Transport, Lagerung
TGL 25062	12.72	Elektrotechnik, Elektronik; EGS, Schwenkrahmen; Hauptkennwerte
TGL 25064/01 bis /06	4.72; 8.72; 12.71	Elektrotechnik, Elektronik; EGS; Systemeigenschaften, Systemmaße der Gefäße/Anordnung von Betätigungs- und Sichtelementen auf Frontplatten/ Lüftungsöffnungen in Gefäßwänden/Farbgestaltung der Geräte und Einrichtungen/Beschriftung auf Betätigungs- und Informationsflächen/Zusammenstellung von Gefäßeinheiten
TGL 25065	12.71	–; –; Karten, Hauptkennwerte
TGL 25068/01 /02	12.71 12.71	–; –; Karteneinschübe, Karteneinsätze
TGL 25071	12.71	–; –; Baugruppenträger, Baugruppeneinschübe, Baugruppeneinsatze, Hauptkennwerte

Standard	Ausgabe	Titel
TGL 25080	12.71	–; –; Schränke, Hauptkennwerte
TGL 26096/01	12.71	Zuverlässigkeit in der Technik; Begriffe
TGL 26096/03	11.73 Entw.	Auswahl von Zuverlässigkeitskenngrößen
TGL 26713	12.72	Mikroelektronik; Bauformen für DIL-Gehäuse
TGL 29711/01 bis /04	10.74	Standard-Interface für Linienverkehr auf Basis TTL; SI 2.2
TGL 28-87/01	6.63	Sinnbilder für textlose Bedienschilder; Richtlinien
TGL 28-87/02	6.63	–; Grundsinnbilder
TGL 28-87/03	6.63	–; Maschinengebundene Sinnbilder
TGL 28-87/04	6.63	–; Anwendungsbeispiele
TGL 28-87/05	11.68	–; Sinnbilder für elektrotechnische Steuerungen
TGL 28-9124/01	10.66	Elektrotechnische Ausrüstungen an Werkzeugmaschinen; Normalausführung
TGL 28-9124/02	7.66	–; Bestellangaben für Sonderausführung
TGL 28-9124/03	7.66	–; Netz- und Vorschriftenverhältnisse
TGL 28-9125/01	12.66	Elektrotechnische Ausrüstungen; Klimaschutz, Allgemeines, Übersicht
TGL 28-9125/04	10.67	–; –, Richtlinie für Konstruktion und Fertigung
TGL 68-58	12.72	Gedruckte Schaltungstechnik; Leiterplatten, Abmessungen
TGL 200-0010	1.72	Gedruckte Schaltungstechnik; Begriffe
TGL 200-0018, dazu 1. Änderungsblatt	1.64	Prüfung von Isolierstoffen; Bestimmung der Kriechstromfestigkeit
TGL 200-0028/01	11.69	Zuverlässigkeit von Bauelementen der Elektronik; Begriffe
TGL 200-0044/01 bis 0/4	1.66	Elektrische Informationstechnik; Informationsgeräte – Begriffe/Technische Forderungen/Prüfung/Lieferung
TGL 200-0057/01 bis /06	6.71	Elektrische Informations- und Meßtechnik; Stoßfolge- und Schwingungsprüfung Begriffe/physikalische Grundlagen/Grundsätze/Prüfklassen/Prüfverfahren mit gleitender Frequenz und festen Frequenzen/Prüfverfahren mit Stoßfolge
TGL 200-0601/01	4.73	Elektrotechnische Anlagen; Allgemeine Errichtungsvorschriften, Begriffe
TGL 200-0601/02	4.73	–; –, Allgemeine technische Forderungen
TGL 200-0601/03	4.73	–; –, Starkstromanlagen mit Nennspannungen bis 1000 V Ws oder 1500 V Gs
TGL 200-0601/05	10.65	Allgemeine Errichtungsvorschriften für elektrische Anlagen, Informationsanlagen
TGL 200-0645/03	7.69	Elektrotechnische Anlagen; Fabrikfertige Baueinheiten für Nennspannungen bis 1000 V; Prüfung
TGL 200-0655/01	12.75 Entw.	Elektrot. Ausrüstungen für Be- und Verarbeitungsmaschinen; Begriffe
/02	6.73	–; Technische Forderungen

Standard	Ausgabe	Titel
TGL 200-0655/03	4.74	–; Technische Forderungen für elektronische Baueinheiten
/04	1.76	–; Prüfung
TGL 200-0862	8.70	Numerische Steuerungen, Code, Auswahl und allmeine Festlegung
TGL 200-0863/01	7.71	Numerische Steuerungen; Programmaufbau, Allmeines
TGL 200-0863/02	7.71	–; –, Bezeichnungssystem
TGL 200-0863/03	7.71	–; –, Zeichenvorrat
TGL 200-0863/04	7.71	–; –, Zusatzfunktionen
TGL 200-0863/05	7.71	–; –, Wegbedingungen
TGL 200-0863/06	7.71	–; –, Vorschübe und Drehzahlen
TGL 200-0863/07	10.73 Entw.	–; –, Anpassungsregelung
TGL 200-8063/08	12.73	–; –, Werkzeugspeicherplatz, Werkzeugkorrektur, Gewindesteigung
TGL 200-3556/01	10.73 Entw.	Gedruckte Schaltungstechnik; Zeichnungen für Leiterplatten, Übersicht
TGL 200-3556/02	10.73	–; –, Bearbeitungszeichnungen
TGL 200-3556/03	10.73 Entw.	–; –, Leiterbildzeichnung
TGL 200-3556/04	10.73 Entw.	–; –, Beschriftungsaufdruckzeichnung
TGL 200-3556/05	10.73 Entw.	–; –, Lötmaskenaufdruck
ZfS 3-04/01	10.68	Lochbänder 5- und 8spurig; Begriffe
ZfS 3-04/02	10.68	–; Maße für Lochung
IEC 204-1	(1965)	Elektrische Ausrüstungen von Maschinen für allgemeine Zwecke
mit Änderung Nr. 1	1.69	
IEC 204-2	1.67	Elektrische Ausrüstung von Maschinen, die in Großserien-Produktionsstraßen eingesetzt werden
IEC 204-3	1968	Elektronische Ausrüstung von Werkzeugmaschinen

ISO

TC 97	Computer und Datenverarbeitung
SC 1	Begriffe und Benennungen
SC 2	Zeichensätze und Codierung
SC 3	Zeichenerkennung
SC 4	Ein- und Ausgabe
SC 5	Programmiersprachen
SC 6	Digitale Datenübertragung
SC 7	Problemdefinition und -analyse
SC 8	Numerische Steuerung von Werkzeugmaschinen

14. LITERATURVERZEICHNIS

Abschnitt 1.

[1.1] *Simon, W.*: Die numerische Steuerung von Werkzeugmaschinen. München: Carl Hanser Verlag 1971.

[1.2] *Opitz*; *Berger*; *Budde*: Automatisierung der Einzel- und Kleinserienfertigung. VDI-Z. (1969) H. 8.

[1.3] *Lerner, A.:* Grundzüge der Kybernetik. Deutsche Bearbeitung Prof. *Reinisch*. Berlin: VEB Verlag Technik 1970.

[1.4] *Bartsch, H.-J.:* Stand der in der DDR hergestellten numerischen Steuerungen. Der VEM-Elektro-Anlagenbau **5** (1969) Messesonderheft, S. 2–7.

[1.5] *Bartsch, H.-J.:* Baugruppensysteme und Anwendung numerischer Steuerungen. msr **13** (1970) H. 11, S. 425–429.

[1.6] *Koenigsberger, F.:* Internationaler Kongreß für Metallbearbeitung (ICM 70). Werkstatt und Betrieb **103** (1970) H. 12, S. 1014.

[1.7] *Kronenberg, M.:* Fortschritte der Automatisierung in den USA. Werkstatttechnik **56** (1966) H. 8, S. 105.

[1.8] 1969 outlook. American machinist (1969) H. 2, S. 149.

[1.9] *Russig, A.:* Einsatz numerisch gesteuerter Maschinen. Lehrbrief 1, KDT, 1971.

[1.10] Zur Situation im USA-Werkzeugmaschinenbau. Marktinformation für Industrie und Außenhandel (1972) H. 51–52, S. 4 u. 5.

[1.11] *Zölzer, H.:* Über die Konferenz der NC-Society am 15. bis 18. April 1973 in New York. Die Maschine (Ludwigsburg) (1973) H. 6, S. 39 u. 40.

[1.12] Außenwirtschaft DDR **1** (1973) H. 2, S. 9 u. 10 [Aus: Vestnik masinostroenija (Moskau) (1972) H. 8].

[1.13] *Opitz, H.; Winkler, H. H.:* Zusammenarbeit, eine Notwendigkeit zur Förderung der NC-Technologie. TZ für prakt. Metallbearbeitung **67** (1973) H. 1, S. 26–28.

Abschnitt 2.

[2.1] *Lerner, A.:* Grundzüge der Kybernetik. Deutsche Bearbeitung Prof. *Reinisch*. Berlin: VEB Verlag Technik 1970.

[2.2] *Aisermann* u. a.: Logik, Automaten, Algorithmen. Berlin: Akademie-Verlag GmbH 1967.

[2.3] *Kämmerer:* Digitale Automaten. Berlin: Akademie-Verlag GmbH 1969.

[2.4] *Woschni:* Information und Automatisierung. Reihe Automatisierungstechnik, Bd. 98. Berlin: VEB Verlag Technik 1970.

[2.5] *Fey, P.:* Informationstheorie. Berlin: Akademie-Verlag GmbH 1968.

[2.6] *Bär, D.; Fuchs, H.:* Kleines Lexikon der Steuerungs- und Regelungstechnik. Reihe Automatisierungstechnik, Bd. 40. Berlin: VEB Verlag Technik 1966.

[2.7] ESEG, Begriffe (Ausgabe Dez. 1971). Institut für Rationalisierung und Organisation der Elektroindustrie, Dresden.
[2.8] *Rechenberg, P.:* Grundzüge digitaler Rechenautomaten. München, Wien: Oldenbourg-Verlag 1968.
[2.9] *Knüpfer, A.:* Technik digitaler Rechenanlagen. Berlin: VEB Verlag Technik 1969.
[2.10] *Götzke, H.:* Programmgesteuerte Rechenautomaten. Leipzig: VEB Fachbuchverlag 1969.
[2.11] *Schubert, G.:* Digitale Kleinrechner. Reihe Automatisierungstechnik, Bd. 5. Berlin: VEB Verlag Technik 1968.
[2.12] *Speiser, A. P.:* Digitale Rechenanlagen. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 1965.
[2.13] *Bartsch, H.-J.:* Mathematische Formeln. 14. Auflage. Leipzig: VEB Fachbuchverlag 1974.
[2.14] *Schneider, H.; Händel, H.:* Ein neues Steuerungssystem, Baugruppen 3-Steuerung. Sonderheft des IfW, Karl-Marx-Stadt, Nr. 27.
[2.15] *Bartsch, H.-J.:* Numerische Steuerung. Fertigungstechnik und Betrieb **20** (1970) H. 8, S. 467–471.
[2.16] *Fischer, H.*, u. a.: Interpolationsverfahren für Bahnsteuerungen bei Werkzeugmaschinen. Siemens-Z. **40** (1966) H. 2, S. 61–66.
[2.17] *Schmid, D.:* Interpolation bei numerischen Bahnsteuerungen. Steuerungstechnik **2** (1969) H. 9, S. 342–349.
[2.18] *Götz, E.:* Digital arbeitende Interpolatoren für numerische Bahnsteuerungen. AEG-Mitteilung **51** (1961) H. 1/2, S. 34–44.
[2.19] *Bartsch, H.-J.; Roland, G.; Tißold, J.:* Einsatz numerisch gesteuerter Maschinen. Lehrbrief 2, KDT, 1971.
[2.20] *Oppelt, W.:* Kleines Handbuch technischer Regelvorgänge. Berlin: VEB Verlag Technik 1964.
[2.21] Forschungsbericht: Untersuchung der Genauigkeit der Annäherung eines Kreisbogens durch einen Polygonzug. Technische Hochschule Karl-Marx-Stadt, 1969 (unveröff.).
[2.22] *Blüsch, H.:* Analogie-Interpolator als Rechenwerk für programmgesteuerte Werkzeugmaschinen. Maschinenbautechnik **8** (1959) H. 11, S. 595 bis 599.

Abschnitt 3.

[3.1] Inkrementaler Geber rotatorisch. Druckschrift des VEB Carl Zeiss JENA 1971.
[3.2] *Russig, A.:* Einsatz numerisch gesteuerter Maschinen. Lehrbrief 3, KDT, 1971.
[3.3] *Köhli:* Fragen der Maßeingabe und Meßwerterfassung bei NCM. TZ für praktische Metallbearbeitung **64** (1969) H. 2, S. 88.
[3.4] *Miller, W.:* Photoelektrische Längen- und Winkelmeßsysteme. Der Elektroniker (1968) H. 2.
[3.5] *Bruckmoser, L.:* Fotoelektrische Verstärkerschaltung. Automatik (1967) H. 10.
[3.6] *Bruckmoser, L.:* Fotodioden und Fotoelemente. Elektronik **16** (1967) H. 1, S. 1–6; H. 2, S. 53–57.

[3.7] *Nentwig, K.:* Fotoelektrische Fühler. Steuerungstechnik **2** (1969) H. 6, S. 229–233.
[3.8] Wälzschraubtriebe. Druckschrift des VEB Carl Zeiss JENA 1972.
[3.9] *Brunner, J.:* Weg- und Winkelmessung an Werkzeugmaschinen mit Hallgeneratoren. Maschinenmarkt **70** (1964) S. 122–124.
[3.10] *Brunner; Lohrbach:* Winkelschrittgeber mit Hallgeneratoren. Siemens-Z. **38** (1964) H. 9, S. 673–675.
[3.11] *Philippow, E.:* Taschenbuch Elektrotechnik. Band 3, Nachrichtentechnik. Berlin: VEB Verlag Technik 1967.
[3.12] *Woschni, E. G.:* Frequenzmodulation. Berlin: VEB Verlag Technik 1962.
[3.13] Lineini magnitni datschik (Linearer magnetischer Geber). Firmenschrift Moskowskii Instrumentalni Sawod „Kalibr" 1972.
[3.14] *Glantschnig, F.:* Digitale Längenmeßgeräte hoher Auflösung. BBC-Mitteilung **54** (1967) H. 4, S. 172–179.
[3.15] AIL-Calibrator (Laser-Interferometer). Firmenschrift Airborne Instruments Laboratory, USA.
[3.16] *Willisen, F. K.; Glantschnig, F.:* Ein automatisches Laser-Interferometer für industrielle Längenmessung. BBC-Mitteilung **55** (1968) H. 1.
[3.17] Werkstatt und Betrieb **104** (1971) S. 145.
[3.18] *Kronenberg, M.:* Numerische Steuerungen mit Laser-Einstellung. TZ für praktische Metallbearbeitung **65** (1971) H. 10, S. 519.
[3.19] *Klievер, W. H.:* Measure position digitally. Control Engineering (1956) H. 11, S. 107–113.
[3.20] *Wätzig:* DWP 35 365.
[3.21] *Götz, E.; Pabst, W.:* DWP 1 189 626.
[3.22] *Brünnler, W.*, u. a.: Winkelcodierer mit Hallgeneratorabtastung. Siemens-Z. **45** (1971) H. 4, S. 259 u. 260.
[3.23] *Appt, D.; Baisch, V.; Brömer, G.:* Wegmessung und Wegregelung an numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen. Siemens-Z. **46** (1973) Beiheft, S. 12–16.
[3.24] *Geyer, W.:* Dynamische und statische Eigenschaften von ausgewählten analogen Lagemeßsystemen bei numerischen Werkzeugmaschinensteuerungen. Regelungstechnik **13** (1965) H. 3, S. 134–138.
[3.25] *Eberle, M.; Waibel, G.:* Ein analog-absolutes Lagemeßsystem für die numerische Steuerung von Werkzeugmaschinen. Siemens-Z. **38** (1964) H. 9, S. 669–672.
[3.26] *Feist, W.:* Rationalisierung durch numerische Steuerungen für Werkzeugmaschinen. Siemens-Z. **35** (1961) H. 8, S. 567–574.
[3.27] *Politsch, H. W.:* Digitale Positionsanzeigen bis zur Meßmaschine. Steuerungstechnik **3** (1970) H. 6, S. 189–193.

Abschnitt 4.

[4.1] *Matzig, H.:* Integrierte Schaltkreise. VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt, Betriebsakademie, 1973.
[4.2] *Fleischhammer, W.:* Gesichtspunkte beim Einsatz von TTL-Schaltkreisen in Datenverarbeitungsanlagen. Elektronische Rechenanlagen **11** (1969) H. 4, S. 204–214.
[4.3] *Khambata, A. J.:* Einführung in die Mikroelektronik. Berlin: VEB Verlag Technik 1967.

[4.4] *Lewicki, A.:* Einführung in die Mikroelektronik. München: Oldenbourg-Verlag 1966.
[4.5] *Möschwitzer, A.:* Integration elektronischer Schaltungen. Berlin: VEB Verlag Technik 1973.
[4.6] *Kobrinski; Trachtenbrot:* Einführung in die Theorie endlicher Automaten. Berlin: Akademie-Verlag GmbH 1967.
[4.7] *Asser:* Einführung in die mathematische Logik. Leipzig: B. G. Teubner Verlagsgesellschaft 1959.
[4.8] *Bär, D.:* Einführung in die Schaltalgebra. Reihe Automatisierungstechnik, Bd. 25. Berlin: VEB Verlag Technik 1966.
[4.9] *Gluschkow, W. M.:* Theorie der abstrakten Automaten. Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften 1962.
[4.10] *Metz, J.; Merbeth, G.:* Schaltalgebra. Leipzig: VEB Fachbuchverlag 1970.
[4.11] Katalog Monolithische Schaltkreise, Serie D 10. VEB Halbleiterwerk Frankfurt (Oder) 1971.
[4.12] Bulletin CB 102: TTL integrated circuits. Texas Instruments, USA.
[4.13] SAK-N 55 „Kartenbaugruppen". VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt.
[4.14] Forschungsbericht: Beschaltung freier Eingänge bei TTL-Schaltkreisen. IEA, Berlin, 1970 (unveröff.).
[4.15] Technischer Bericht: Ermittlung der Anzahl gleichartiger in Reihe geschalteter Bauelemente. VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt, 1970 (unveröff.).
[4.16] *Kaiser, W.:* Die Störsicherheit bei Werkzeugmaschinensteuerungen mit integrierter Schaltkreistechnik. Steuerungstechnik **3** (1970) H. 1, S. 10–15.
[4.17] *Volkland, P.:* Definition von statischen Störschwellen in Logiksystemen. Der VEM-Elektro-Anlagenbau **8** (1972) H. 3, S. 103–107.
[4.18] *Tornau, F.*, u. a.: VEM-Handbuch Elektrische Störbeeinflussung in Automatisierungs- und Datenverarbeitungsanlagen. Berlin: VEB Verlag Technik 1973.
[4.19] Technischer Bericht 3: Stromversorgung Bausteine NC. VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt, 1969 (unveröff.)
[4.20] Technischer Bericht 5: Reflexion auf Taktleitungen und deren Beseitigung. VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt, 1970 (unveröff.).
[4.21] Technischer Bericht FS 42: Grundsätze und Richtwerte zur Vermeidung systemeigener Störungen bei TTL-Schaltkreisen. IEA, Berlin, 1970 (unveröff.).
[4.22] *Häußler, V.; Schertell, D.:* Probleme der Störbeeinflussung bei TTL-Schaltkreisen unter besonderer Berücksichtigung systemeigener Kopplungen. Der VEM-Elektro-Anlagenbau **8** (1972) H. 2, S. 90–96.
[4.23] *Schertell, D.:* Reflexionsprobleme beim Einsatz schnellschaltender Schaltkreise. Der VEM Elektro-Anlagenbau **8** (1972) H. 3, S. 97–103.
[4.24] *Grubba, K.:* Halbleiterblock-Schaltkreise und ihr Einsatz in der Steuerungstechnik. Der VEM-Elektro-Anlagenbau **8** (1972) H. 2, S. 75–81.
[4.25] Technischer Bericht 9: Übersprechen auf Leiterplatten „Bausteine NC" VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt, 1970 (unveröff.).
[4.26] Technischer Bericht 47: Kapazitive Störbeeinflussung bei TTL-Schaltkreisen. VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt, 1969 (unveröff.).
[4.27] Technischer Bericht 138: Vorläufige Richtlinie zur Verdrahtung von NC 400. VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt, 1971 (unveröff.).

[4.28] Technischer Bericht 140: Störuntersuchungen auf Leitungen, die die Rückverdrahtung nachbilden, bei systemeigenen Impulsen. VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt, 1970 (unveröff.).
[4.29] Technischer Bericht 118: Laboruntersuchungen NC 470. VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt, 1971 (unveröff.).
[4.30] *Lobigkeit, V.:* Elektronische Maschinensteuerungen – Universal- oder Funktionsgruppen-Steckkarten? Elektronik **21** (1972) H. 1, S. 21 u. 22.
[4.31] *Buttstädt* u. a.: Letzte Werkzeugmaschinenausstellung mit ausschließlich westeuropäischer Beteiligung. Werstatt und Betrieb **104** (1971) H. 12, S. 873ff.
[4.32] *Vetsch, H. P.; Hellmin, G.:* Konstruktive Gestaltung der IC-Baureihe. BBC-Mitteilung **54** (1967) S. 162 bis 171.
[4.33] Technischer Bericht 12: Themenstudie „Bausteine NC". VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt, 1970.
[4.34] *Widl, G.:* DNC-CNC; die vierte Generation numerischer Steuerungen. Werkstatt und Betrieb **104** (1971) H. 8, S. 553–558.
[4.35] Technischer Bericht 8: Einsatzbedingungen Bausteine NC. VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt, 1970 (unveröff.).
[4.36] *Holle, W.; Tietz, D.:* Qualitätssicherung bei der Fertigung gedruckter Schaltungen. Sozialistische Rationalisierung (1974) H. 3, S. 68–73.

Abschnitt 5.

[5.1] *Bartsch, H.-J.:* Stand und Entwicklungstendenzen numerischer Steuerungen. Der VEM Elektro-Anlagenbau **10** (1974) H. 2, S. 49–54.
[5.2] *Zeleny, J.:* Zur „Philosophie" der NC-gesteuerten Werkzeugmaschinen in der ČSSR. Technica (Basel) (1973) H. 12, S. 1147–1152; 1159–1163.
[5.3] Serie Mark Century 7500. Prospektmaterial der General Electric.
[5.4] Siemens-Z. **47** (1973) Beiheft „Steuerungen und Antriebe zur Automatisierung der Werkzeugmaschine".
[5.5] Prospektmaterial der Serie NC 400; AEG.
[5.6] Prospektmaterial der Serien H und T; Bosch-Bendix.
[5.7] Prospektmaterial der Serie MTC; Saab Electronic.
[5.8] Forschungsbericht: Analyse der Informationsflüsse zwischen den verschiedenen Orten der Informationsverarbeitung bei NC-Werkzeugmaschinen. Technische Hochschule Karl-Marx-Stadt, 1971 (unveröff.).
[5.9] *Klinge, R.; Waibel, G.:* Fertigungsautomatisierung mit NC und Rechnern. Regelungstechnische Praxis und Prozeßrechentechnik **13** (1971) H. 2, S. 3–13.
[5.10] *Waibel, G.; Studer, F.:* Nahtstellenprobleme bei der direkten Führung von NCM mit einem Prozeßrechner. Regelungstechnik und Prozeß-Datenverarbeitung **18** (1970) H. 7, S. 292–300.
[5.11] Spanabhebende Werkzeugmaschinen aus der ČSSR (XIV. Internationale Maschinenmesse Brünn). Maschine und Werkzeug **73** (1972) H. 17, S. 15 bis 20.
[5.12] *Schmid, D.:* Informationsverarbeitung durch die numerische Bahnsteuerung. Steuerungstechnik **4** (1971) H. 12, S. 428–431.
[5.13] *Corbach, K.:* Bahnsteuerungen für mittlere und kleinere Drehmaschinen. Werkstatt und Betrieb **104** (1971) H. 10, S. 771–773.

[5.14] A-Mitteilung 84: Beitrag zur dynamischen Messung von FF-Schaltkreisen und deren Kombination. IEA, Berlin, 1969 (unveröff.).
[5.15] *Preuß, U.:* Ergänzungsschaltungen zu TTL-Schaltkreisen. Der VEM Elektro-Anlagenbau **8** (1972) H. 2, S. 81–90.
[5.16] Data Book 1, Semiconductor and Components. Texas Instruments, 1968.
[5.17] A-Mitteilung 106: Nennwertentwurf von Ergänzungsschaltungen. IEA, Berlin, 1969 (unveröff.).
[5.18] Technischer Bericht 118: Laboruntersuchung NC 470. VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt (unveröff.).
[5.19] *Wollny, J.:* Punkt-, Strecken- und Bahnsteuerungen mit Dreifachinductosyn. Regelungstechnik **13** (1965) S. 138–140.
[5.20] *Winhold, H.:* Ortsmeßsysteme für numerisch gesteuerte Werkzeugmaschinen. BBC-Mitteilungen **54** (1967) H. 8, S. 61–68.
[5.21] *Röske:* Gegenüberstellung verschiedener Schaltungen zur Impulsübertragung auf Leitungen. Mitt. aus dem FZ des Werkzeugmaschinenbaues, Karl-Marx-Stadt, 1971.
[5.22] *Schulz, H.:* Die störungsfreie Impulsübertragung – eine Voraussetzung für digital-inkrementale Steuerungssysteme. Werkstatt und Betrieb **99** (1966) H. 6, S. 385–390.
[5.23] *Engelskirchen:* Prinzip und Einsatz der Datenfernverarbeitung. TZ für praktische Metallverarbeitung **63** (1969) H. 2, S. 75.
[5.24] Technischer Bericht 147: Entwurf logischer Schaltungen mit TTL-Bauelementen. VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt, 1972 (unveröff.).
[5.25] A-Mitteilung 69: Sonderschaltungen zur Serie SN 74 (Literaturbericht). IEA, Berlin, 1968 (unveröff.).
[5.26] Schwingquarze. Druckschrift VEB NARVA, Berlin.
[5.27] Technischer Bericht 11: Ergänzungsschaltungen. VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt, 1970 (unveröff.)
[5.28] Technischer Bericht 1: Grobentwurf für Ergänzungsschaltungen zur Serie SN 74. VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt, 1969 (unveröff.).
[5.29] Technischer Bericht: Digitaler Inneninterpolator. VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt, 1968 (unveröff.).
[5.30] Technischer Bericht 134: Entwurf der Funktionseinheit Interpolator. VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt, 1970 (unveröff.).
[5.31] Technischer Bericht 178: Teiltypprüfung Funktionstüchtigkeit NC 450 an FUW 250 NC. VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt, 1972 (unveröff.).
[5.32] Technischer Bericht 159: Koordinatenrechner. VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt, 1970 (unveröff.).
[5.33] Technischer Bericht 98: Entwurf Gewindeschneiden. VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt, 1970 (unveröff.).
[5.34] Technischer Bericht 87: Geschwindigkeitssteuerwerk. VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt, 1969 (unveröff.).
[5.35] Technischer Bericht 149: Direkte Vorschubprogrammierung. VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt, 1972 (unveröff.).
[5.36] Technischer Bericht: Untersuchung des Ausbaues der Bahnsteuerung NC 450 um 1 bis 2 Streckenachsen bzw. ihre Abrüstung auf eine Streckensteuerung. VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt, 1970 (unveröff.).

[5.37] Technischer Bericht 89: Entwurf „Konstantgeschwindigkeit" VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt, 1969.
[5.38] Technischer Bericht 93: Digitaler Vergleicher für Bahnsteuerung mit inkrementalem Meßwertgeber. VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt, 1972.
[5.39] *Uhlig, A.:* Lageregelkreise an Bahnsteuerungen. Der VEM Elektro-Anlagenbau **10** (1974) H. 4, S. 153–158.
[5.40] Technischer Bericht 2: Dimensionierung von Ergänzungsschaltungen. VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt, 1969.
[5.41] *Habiger, E.:* Maßnahmen zum Herabsetzen der äußeren Störbeeinflussung bei NCM. Der VEM Elektro-Anlagenbau **5** (1969) H. 3, S. 53–58.
[5.42] Technischer Bericht 1 u. 2: Forderungen an Ergänzungsschaltungen, Lösungsvorschläge. VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt, 1968.

Abschnitt 6.

[6.1] *Storr, A.:* Tendenzen der Steuerungstechnik für Werkzeugmaschinen in den USA. Steuerungstechnik **6** (1973) H. 2, S. 41 u. 42.
[6.2] *Bornhorst, H.; Engelhard, D.:* Das freiprogrammierbare Steuerungssystem Simatic S3 im Werkzeugmaschinenbau. Siemens-Z. **47** (1973) Beiheft „Steuerungen und Antriebe zur Automatisierung der Werkzeugmaschine" S. 56–61.
[6.3] Programmable Matrix Controller (PMC 1750). Firmenschrift Allen-Bradley Co., 1973.
[6.4] Programmierbares Steuergerät Modell 184. Firmenschrift Balluff/Modicon Co., 1973.
[6.5] *Wiechert, K.:* Realisierung eines programmierbaren Logikwerkes zur Steuerung technologischer Prozesse. Der VEM-Elektro-Anlagenbau **9** (1973) H. 1, S. 39–43.
[6.6] *Bailaye, G.:* Mikroprogrammerowanie (Mikroprogrammierung). Moskau: Verlag Mir 1973.
[6.7] *Kleim, D.; Rompt, B.:* Der Aufbau des Systems Procontic. BBC-Nachrichten **60** (1973) H. 8/9, S. 200–207.
[6.8] Pribori na osnowje amorphich poluprowodnikowich materialow (Geräte auf der Grundlage amorpher Halbleitermaterialien). Elektronika (1970) H. 20, S. 4–23.
[6.9] *Eberle, M.; Spingler, H.:* Vorschubantriebe hoher dynamischer Güte für Werkzeugmaschinen. Siemens-Z. **45** (1971) H. 4, S. 201–203.
[6.10] *Sfax, E.:* Stufenlos stellbare Gleichstromantriebe für Werkzeugmaschinen. Technischer Informationsdienst 25 IFW Karl-Marx-Stadt, 1968.
[6.11] Autorenkollektiv: VEM-Handbuch – Die Technik der elektrischen Antriebe. Antriebstechnik in der Praxis. Berlin: VEB Verlag Technik 1964.
[6.12] *Zander, H.:* Schaltung und Reglerkonzeption beim Einsatz moderner Leistungselektronik. Steuerungstechnik **2** (1969) H. 1, S. 5–9.
[6.13] *Pohle, G.:* Regelung der Drehzahl von Elektromotoren durch Einsatz von Thyristoranlagen des Thyresch-Systems. Der VEM Elektro-Anlagenbau **6** (1970) H. 4, S. 145–154.
[6.14] *Krause, J.:* Thyristor-Stellglieder zur Speisung von Gs-Reversierantrieben geringer Leistung. ELEKTRIE **24** (1970) H. 6, S. 200–202.
[6.15] Leistungselektronik. Berlin: VDE-Verlag GmbH 1970.

[6.16] *Lappe, R.:* Thyristor-Stromrichter für Antriebsregelungen. Berlin: VEB Verlag Technik 1970.
[6.17] Autorenkollektiv: VEM-Handbuch – Die Technik der elektrischen Antriebe, Grundlagen. 5. Aufl. Berlin: VEB Verlag Technik 1974.
[6.18] *Möltgen, G.:* Thyristoren in der technischen Anwendung. Band 2: Netzgeführte Stromrichter. Berlin, München: Siemens AG. 1967.
[6.19] *Bock, L.:* Elektrische Vorschubantriebe für NCM. Antriebstechnik **5** (1966) H. 12.
[6.20] *Kloock, D.:* Wirkungsweise und Anwendung von Gleichstromstellern. Der Elektro-Praktiker **25** (1971) H. 11, S. 349–353.
[6.21] *Seidel, H.:* Reaktionsschnelle Antriebe mit Gs-Reversierstellern. Der VEM Elektro-Anlagenbau **7** (1971) H. 3, S. 108–111.
[6.22] *Eisenhuth, J.:* „Thyresch"-Gleichstromsteller – ein Stellglied für hochwertige Antriebe. Der VEM Elektro-Anlagenbau **7** (1971) H. 3, S. 107 u. 108.
[6.23] *Beyer, E.; Haberkorn, K.:* Transistor-Gleichstrom-Antrieb. Neuererervereinbarung im VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt, 1970.
[6.24] *Schulze, M.:* Transistor-Gleichstromsteller für reaktionsschnelle Antriebe kleiner Leistung. ELEKTRIE **28** (1974) H. 7, S. 368–371.
[6.25] Technischer Bericht 175: Transistorpulssteller. VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt, 1972 (unveröff.).
[6.26] Technischer Bericht 176: Labormustererprobung des Transistorpulsstellers 160 W und 400 W. VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt, 1972 (unveröff.).
[6.27] Motoren und Verstärker. Firmenschrift Fa. Gettys.
[6.28] *Eberle, M.; Groß, H.:* Vorschubantrieb für Werkzeugmaschinen. Siemens-Z. **47** (1973) Beiheft, S. 26–30.
[6.29] *Schulze, M.; Riedel, S.:* Vorschubantriebe für hochautomatisierte Werkzeugmaschinen. Der VEM Elektro-Anlagenbau **10** (1974) H. 2, S. 72–77.
[6.30] Gleichstrom-Stellmotoren, Typenreihe GSM. Firmenkennblatt VEB Kombinat Elektromaschinenbau, Dresden.
[6.31] *Pötschke, H.:* Scheibenläufermotoren und ihre Eigenschaften. Steuerungstechnik **2** (1969) H. 10, S. 398–400.
[6.32] Technische Daten des Hohlläufers Typ HL 15. Firmenschrift der Blocher-Motor KG, BRD, 1969.
[6.33] *Petermann, J.; Reinhold, D.:* Elektrohydraulisch geregelte Vorschubantriebe für Werkzeugmaschinen. Manuskriptdruck der 6. internationalen Werkzeugmaschinentagung, Dresden, 1968.
[6.34] *Bock, L.:* Elektrische und elektrohydraulische Schrittmotoren. Steuerungstechnik **1** (1968) H. 1, S. 13–18.
[6.35] Inkrementaler Positionssteller. Firmenschrift VEB Carl Zeiss JENA 1971.
[6.36] *Waller, S.:* Bahnsteuerung mit elektrohydraulischen Schrittmotoren bei Drehmaschinen. TZ für praktische Metallbearbeitung **61** (1966) H. 2, S. 61–66.
[6.37] *Bock, L.:* Anforderungen an die Antriebe für NCM. Antriebstechnik **4** (1965) H. 11.
[6.38] *Römer, K.; Dorauth, K.-H.:* Stetig steuerbare Vorschubantriebe mit Gs-Motoren. Steuerungstechnik **1** (1968) H. 3, S. 108–113.
[6.39] *Oppelt, W.:* Kleines Handbuch technischer Regelvorgänge. Weinheim/Bergstraße: Verlag Chemie 1960.

[6.40] *Rogos, J.:* Entwicklungstendenzen für den Einsatz von Kleinrechnern als Digitalrechner. Regelungstechnik **17** (1969) H. 2.
[6.41] Belegarbeit (*Borges*): Ermittlung konkreter Zuverlässigkeitsangaben NC 400. VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt, 1972 (unveröff.).
[6.42] *Frankovič, B.; Petráš, St.; Skákala, J.; Vykouk, B.:* Automatisierung und selbsttätige Steuerung. Berlin: VEB Verlag Technik 1970.
[6.43] *Augsten, G.:* Stetige Lageregelkreise an Werkzeugmaschinen. Steuerungstechnik **4** (1971) H. 12, S. 432–435; **5** (1972) H. 3, S. 41–44.
[6.44] *Bellmann, B.:* Werkzeugmaschinenausstellung Olympia, London, 1972.
[6.45] *Hailer, J.:* Der Einfluß von Schwingungen auf die Genauigkeit von Wegregelkreisen bei NCM. Siemens-Z. **38** (1964) H. 9, S. 680–685.
[6.46] *Futh:* Elektronische Datenverarbeitung. Band 1. München: R. Oldenbourg Verlag 1966.
[6.47] *Solodownikow, W. W.:* Grundlagen der selbsttätigen Regelung in 2 Bänden. Berlin: VEB Verlag Technik; München: R. Oldenbourg Verlag 1958.
[6.48] *Göldner, K.:* Mathematische Grundlagen für Regelungstechniker. Leipzig: VEB Fachbuchverlag 1968.

Abschnitt 7.

[7.1] Technischer Bericht 165: Stromversorgung für das Steuerungssystem NC 400. VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt, 1972 (unveröff.).
[7.2] *Vogel, B.:* Stromversorgung für das Steuerungssystem NC 400. Der VEM Elektro-Anlagenbau **10** (1974) H. 4, S. 158–161.
[7.3] *Habiger, E.; Heß, K.:* Zur Funktionsbeschreibung industrieller Steuerungen mit fester logischer Struktur. ELEKTRIE **27** (1973) H. 7, S. 358 bis 362.
[7.4] *Habiger, E.; Heß, K.:* Der Programmablaufplan – ein Hilfsmittel zur systematischen Fehlerortung in industriellen Steuerungen. ELEKTRIE **27** (1973) S. 634–636.
[7.5] *Küchler, D.:* Rechnergestützte Fehlerortung bei digitalen Schaltungsbaugruppen. ELEKTRIE **27** (1973) H. 12, S. 637–639.
[7.6] *Habiger, E.:* Störschutzbeschaltungen für elektronisch und magnetisch betätigte Geräte – eine Literaturübersicht. ELEKTRIE **27** (1973) H. 5, S. 266 u. 267.
[7.7] IEC-TC 44: Elektrische Ausrüstung von Industriemaschinen, Interface zwischen numerischen Steuerungen und Werkzeugmaschinen.

Abschnitt 8.

[8.1] *Tißold, J.:* Der Prüfprozeß – ein wesentlicher Teil des Fertigungsprozesses numerischer Steuerungen der dritten Generation. Der VEM Elektro-Anlagenbau **9** (1973) H. 4, S. 151–156.
[8.2] Technischer Bericht 114: Prüfung von Bauelementen. VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt, 1971 (unveröff.).
[8.3] Technischer Bericht 116: Grobkonzeption für ein KBG-Prüfgerät. VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt, 1970 (unveröff.).
[8.4] *Böhm, G.; Richter, G.:* Prüfung von Verdrahtungsrahmen und KME-10-Logikbaugruppen mit dem Kleinrechnersystem KRS 4200. Sozialistische Rationalisierung in der Elektrotechnik/Elektronik (1974) H. 2, S. 54–60.

[8.5] Technischer Bericht 135: Grobkonzeption Fehlerortung an digitalen KBG. VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt, 1971 (unveröff.).
[8.6] *Dube, E.; Freytag, W.-R.:* Fehlerortung auf Logikbaugruppen in KME-10-Technik mit Hilfe eines Prozeßrechners. Sozialistische Rationalisierung in der Elektrotechnik/Elektronik (1974) H. 3, S. 91–96.
[8.7] *Ermilov, A. V.:* Methode der Auswahl wesentlicher Fehler für die Diagnose digitaler Systeme. Avtomatika i telemechanika **41** (1971) H. 1, S. 159 bis 167; H. 3, S. 107–113.
[8.8] *Holle, W.; Tietz, D.:* Qualitätssicherung bei der Fertigung gedruckter Schaltungen. Sozialistische Rationalisierung in der Elektrotechnik/Elektronik (1974) H. 3, S. 68–73.
[8.9] Technischer Bericht 121: Verdrahtungs- und Verdrahtungsprüfgerät für Einbaurahmen. VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt, 1971 (unveröff.).
[8.10] Technischer Bericht 107: Grobkonzeption des Bedienblendenprüfgerätes. VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt, 1970 (unveröff.).
[8.11] *Hesse, R.; Heeg, D.:* Endfunktionsprüfung im Fertigungsprozeß des numerischen Steuerungssystems NC 400. Der VEM Elektro-Anlagenbau **10** (1974) H. 2, S. 80–83.
[8.12] Technischer Bericht 119: Konzeption des Komplexservicegerätes. VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt, 1971 (unveröff.).
[8.13] *Beyer, E.; Öhme, J.:* IC-Pulser und IC-Tester, Rationalisierungsmittel zur Fehlerortung. Der VEM Elektro-Anlagenbau **10** (1974) H. 3, S. 142–144.
[8.14] *Baisch, R.:* Wartung von numerischen Steuerungen für Werkzeugmaschinen. TZ für praktische Metallbearbeitung **61** (1967) H. 9, S. 532–534.
[8.15] *Störner, H.:* Mathematische Theorie der Zuverlässigkeit. Berlin: Akademie-Verlag GmbH 1970.
[8.16] *Dummer; Griffin:* Zuverlässigkeit in der Elektronik. Berlin: VEB Verlag Technik 1968.
[8.17] *Hummitzsch, P.:* Zuverlässigkeit von Systemen. Reihe Automatisierungstechnik, Bd. 28. Berlin: VEB Verlag Technik 1965.
[8.18] *Gnedenko, B. W.; Beljajew, J. K.; Solowjew, A. D.:* Mathematische Methoden der Zuverlässigkeitstheorie 1 und 2. Berlin: Akademie-Verlag GmbH 1968.
[8.19] *Nikolaizik:* Zuverlässigkeit, Terminologie. Der VEM Elektro-Anlagenbau **7** (1971) H. 1, S. 1–4.
[8.20] *Brünecke, K.:* Mathematische Hilfsmittel zur Berechnung der Zuverlässigkeit. Der VEM Elektro-Anlagenbau **7** (1971) H. 1, S. 4–13.
[8.21] *Brünecke, K.:* Zuverlässigkeit von Elementen. Der VEM Elektro-Anlagenbau **7** (1971) H. 1, S. 13–19.
[8.22] *Nikolaizik:* Zuverlässigkeit von Systemen. Der VEM Elektro-Anlagenbau **7** (1971) H. 1, S. 20–39.
[8.23] *Storm, R.:* Wahrscheinlichkeitsberechnung, mathematische Statistik, statistische Qualitätskontrolle. Leipzig: VEB Fachbuchverlag 1969.
[8.24] *Reinschke, K.:* Bemerkungen zur Ausfallrate und zu anderen quantitativen Zuverlässigkeitskenngrößen. Nachrichtentechnik **19** (1969) H. 2, S. 41–48.
[8.25] Technischer Bericht 7: Zuverlässigkeitsbetrachtung zu Kartenbaugruppen NC. VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt, 1970 (unveröff.).
[8.26] Technischer Bericht 96: Zuverlässigkeitsbetrachtung zum Steuerungssystem NC 400. VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt (unveröff.).

[8.27] Technischer Bericht: Erfassung und Auswertung von statistischen Daten über Ausfälle an NCM. Technische Hochschule Karl-Marx-Stadt, 1971.
[8.28] *Kubein; Gottschalk:* Zuverlässigkeitsuntersuchungen an NCM. Fertigungstechnik und Betrieb **22** (1972) H. 5, S. 277–281.
[8.29] *Carter, W.:* Entwicklungstendenzen in der numerischen Steuerungstechnik. Werkstatt und Betrieb **105** (1972) H. 5, S. 385–389.

Abschnitt 9.

[9.1] *Schmid, D.; Schenke, L.:* NC, CNC, DNC, AC, Fortschritte in der Fertigungstechnik. ETZ-B **22** (1970) H. 22, S. 525–527.
[9.2] *Ullrich; Otto; Felber:* Adaptive Regelung an Werkzeugmaschinen. Sonderheft des IfW, Karl-Marx-Stadt, 1969.
[9.3] *Kasischke, K.:* 6. Japanische Internationale Werkzeugmaschinen-Ausstellung. Starke Fortentwicklung der NC-Technologie. TZ für praktische Metallbearbeitung **67** (1973) H 5, S. 192–198.
[9.4] '73 outlook. American Machinist **117** (1973) H. 2, S. 69–92.
[9.5] *Vollmer, H.-J.:* „Fühlende" Werkzeuge für Maschinen von morgen. „Neues Deutschland" vom 30. 9. 1972.
[9.6] System 1000. Firmenschrift Fa. Philips, Niederlande.
[9.7] Adaptiv-control-Werkzeugmaschinen. Firmenschrift Makino Fräsmaschinenfabrik, Japan.
[9.8] *Stöferle; Bellmann:* Verschleißsensoren für AC bei der Drehbearbeitung. Werkstatt und Betrieb **105** (1972) H. 8, S. 577–582.
[9.9] *Gaewskij, J. S.:* Optimierungssystem für Steuerprogramme von Werkzeugmaschinen. Stanki i Instrument **43** (1973) H. 6, S. 6–8.
[9.10] *Kolotenkow, W. A.:* Adaptive Control geometrischer und technologischer Größen beim Zerspanen. Steuerungstechnik **4** (1971) H. 8, S. 175–182.
[9.11] *Gorodezikij, M. C.; Bronstein, G. W.:* Systeme mit Selbstprogrammierung der Werkzeugbahn. Stanki i Instrument **43** (1973) H. 3, S. 33 u. 34.
[9.12] *Kaminskaja, W. W.:* Entwicklungstendenzen adaptiver Steuerungssysteme für die NC-Werkzeugmaschine. Stanki i Instrument **43** (1973) H. 3, S. 2–4.
[9.13] *Gölöncsèr, J.; Mall, H.-G.:* Revolverdrehmaschine mit Adaptiv Control. TZ für praktische Metallbearbeitung **67** (1973) H. 9, S. 411–414.
[9.14] *Kowaltschuk, E. P.:* Adaptive Steuerung des Zahnschleifprozesses. Stanki i Instrument **43** (1973) H. 3, S. 25–27.
[9.15] *Balakshin, B. S.:* Notwendigkeit der Ausrüstung von NC-Werkzeugmaschinen mit adaptiven Regelsystemen. Stanki i Instrument **43** (1973) H. 3, S. 4–6.
[9.16] *Basrow, B. M.:* Methoden zur Erhöhung der Bearbeitungsgenauigkeit von Drehteilen durch adaptive Steuerung. Stanki i Instrument **43** (1973) H. 3, S. 8–11.
[9.17] *Cronjäger* u. a.: Anwendung adaptiver Systeme bei Fertigungsvorgängen. VDI-Zeitschrift **112** (1970) 3, S. 139–147.
[9.18] Adaptive Steuerung einer Rundschleifmaschine. Werkstatt und Betrieb **104** (1971) H. 6, S. 391–396.
[9.19] *Maier, K.:* Anpaß- und Optimierregeleinrichtung an Werkzeugmaschinen. Steuerungstechnik **2** (1969) H. 6, S. 220–224.

Abschnitt 10.

[10.1] *Lauber, R.:* Strukturen von Automatisierungssystemen. Regelungstechnik **16** (1968) H. 9.

[10.2] *Geyer, W.; Waller, S.:* Direktführung numerisch gesteuerter Werkzeugmaschinen mit einem Fertigungsleitrechner. Siemens-Z. **44** (1970) S. 271–275.

[10.3] *Spur, G.; Pätzold, A.; Zastrow, F.:* Einsatz und Ausbaumöglichkeit eines DNC-Systems in der industriellen Fertigung. Z. wirtschaftlicher Fertigung **68** (1973) H. 4, S. 171–177.

[10.4] *Friedrich, C.; Götz, E.:* NC – CNC – DNC, Rechnereinsatz in der NC-Technik. Steuerungstechnik **3** (1970) H. 8, S. 254–258.

[10.5] *Keßner, H.; Schneider, H.*, u. a.: Concema. Information des Forschungszentrums des Werkzeugmaschinenbaus Karl-Marx-Stadt, 1972.

[10.6] *Mesniaeff, P. G.:* Computerunterstützte NC. ingenieur digest **10** (1971) H. 9, S. 93–97.

[10.7] *Gehrels, J.; Waibel, G.:* Anwendungsbreite freiprogrammierbarer numerischer Steuerungen. Siemens-Z. **47** (1973) Beiheft, S. 61–65.

[10.8] *Meyer, J.; Santter, G.:* Sinumerik 580, eine freiprogrammierbare numerische Steuerung. Siemens-Z. **47** (1973) Beiheft, S. 65–69.

[10.9] Pflichtenheft CNC 500. VEB Starkstrom-Anlagenbau Karl-Marx-Stadt (unveröff.).

[10.10] *Behrendt, W. K.:* Stand der numerisch gesteuerten Fertigung in einem Industrieunternehmen. TZ für praktische Metallbearbeitung **67** (1973) H. 5, S. 181–191.

Abschnitt 11.

[11.1] *Legner, H.:* Numerische Steuerungen in der Karosseriefertigung. Werkstatt und Betrieb **105** (1972) H. 8, S. 565–568.

[11.2] *Semrad, H.; Hofmann, M.; Straß, K.:* Einsatz numerisch gesteuerter Maschinen. Lehrbriefe 4 und 5, KDT, 1971.

[11.3] Gildemeister-Programmiersystem EASYPROG. Firmenschrift, 1973.

[11.4] *Shah, R.:* NC-Handbuch. Zürich: Eigenverlag 1971.

[11.5] *Schreiter, H.; Riedel, K.; Schubert, G.; Spielberg, D.; Wetzel, J.:* SYMAP – eine Sprache für numerisch gesteuerte Werkzeugmaschinen. Einführung und SYMAP (B). Reihe Automatisierungstechnik, Bd. 134. Berlin: VEB Verlag Technik 1972.

[11.6] –.: SYMAP (PS) und SYMAP (DB). Reihe Automatisierungstechnik, Bd. 135. Berlin: VEB Verlag Technik 1972.

[11.7] –.: Praxis der SYMAP-Programmierung. Reihe Automatisierungstechnik, Bd. 147. Berlin: VEB Verlag Technik 1973.

[11.8] *Richter, H.:* SYMAP – Allgemeine Erläuterungen. Information Nr. 3 des FZ des Werkzeugmaschinenbaues im VEB Werkzeugmaschinenkombinat „Fritz Heckert", Karl-Marx-Stadt, 1970.

[11.9] *Richter, H.; Zemmrich, H.; Hendel, K.:* AUTOTECH/SYMAP(B)–KOPGK, Beschreibung der R 300-Version. Information Nr. 14 des FZ des Werkzeugmaschinenbaues im VEB Werkzeugmaschinenkombinat „Fritz Heckert", Karl-Marx-Stadt, 1973.

[11.10] *Schreiter, H.:* Information Nr. 8 des FZ des Werkzeugmaschinenbaues im VEB Werkzeugmaschinenkombinat „Fritz Heckert", Karl-Marx-Stadt, 1971.

[11.11] *Richter, H.; Hellmuth, W.; Scholz, W.; Hengmith, S.:* SYMAP (PS) – BOFR 1 – Sprachbeschreibung. Information Nr. 6 des FZ des Werkzeugmaschinenbaues im VEB Werkzeugmaschinenkombinat „Fritz Heckert", Karl-Marx-Stadt, 1971.

[11.12] Sprachbeschreibung AUTOTECH/SYMAP – BO 2 FR 2. FZ des Werkzeugmaschinenbaues im VEB Werkzeugmaschinenkombinat „Fritz Heckert", Karl-Marx-Stadt, 1974.

[11.13] Anwenderbeschreibung für NC-Programmiersystem MINI-SYMAP. VEB Leitzentrum für Anwendungsforschung der VVB Maschinelles Rechnen, Berlin, Außenstelle Schwerin, 1973.

[11.14] Programmieranleitung AUTOTECH/SYMAP – DR 1. VEB Werkzeugmaschinenkombinat „7. Oktober", Berlin, 1972.

[11.15] *Thierfelder, S.; Püschmann, D.:* AUTOTECH/SYMAP BOFR 3 – Programmieranleitung. FZ des Werkzeugmaschinenbaues im VEB Werkzeugmaschinenkombinat „Fritz Heckert", Karl-Marx-Stadt, 1974.

[11.16] *Breuherr, M.; Zieger, C.:* AUTOTECH/SYMAP DR 4 – Anleitung zur maschinellen Programmierung. FZ des Werkzeugmaschinenbaues im VEB Werkzeugmaschinenkombinat „Fritz Heckert", Karl-Marx-Stadt.

[11.17] *Gutweniger, L.; Riedel, K.:* Maschinelle Programmierung von NC-Maschinen für die Bearbeitung komplizierter ebener Konturen. Fertigungstechnik und Betrieb **23** (1973) H. 10, S. 612–625.

[11.18] Katalog für Rationalisierungslösungen. FZ des Werkzeugmaschinenbaues im VEB Werkzeugmaschinenkombinat „Fritz Heckert", Karl-Marx-Stadt, 1973.

[11.19] *Koloc, H.; Preisler, J.; Vymer, J.:* Das AUTOPROG-System – Ein Beitrag zur Integration des Fertigungsprozesses. TZ für prakt. Metallbearbeitung **62** (1968) H. 2, S. 83–87.

[11.20] *Brechtel, H.:* Modulartechnik – Zukunftsweg der NC-Programmierung. TZ für prakt. Metallbearbeitung **67** (1973) H. 6.

Abschnitt 12.

[12.1] *Schoppnies:* Die MOS-Technologie, Stand und Perspektive. radio fernsehen elektronik **18** (1969) H. 17, S. 555–557.

[12.2] *Henkel, D.:* Die Anwendung vom MOST's in integrierten digitalen Schaltungen. radio fernsehen elektronik **18** (1969) H. 3, S. 74–76 u. H. 4, S. 120 bis 122.

[12.3] *Schlick, K.:* Elektronik heute und morgen. rtr **13** (1971) H. 1, S. 1–3.

[12.4] *Metschl, E.:* Feldplatten, Wirkungsweise und Anwendung. Steuerungstechnik **3** (1970) H. 4, S. 123–129.

[12.5] *Moritz, J.; Mundt, R.:* Applikationsbeispiele mit Thyristorbauelementen – Halbleiterschalter. Der Elektro-Praktiker **25** (1971) H. 11, S. 354–356.

[12.6] Symposium „Electronics 1985". Electronic Design **20** (1973) H. 13, S. 34 bis 36.

[12.7] *Kochan, D.; Bock, H.-J.:* Tagung Prolamat 73. Fertigungstechnik und Betrieb **24** (1974) H. 1, S. 52–56.

15. SACHWÖRTERVERZEICHNIS

Abkürzungen 318
Ablaufsteuerung 23
Abschalt/blockade 199
– kreis 23, 184, 259
Absolute Messung 77
Absolute Verfahren 23
Abtast/regelung 261
– theorem 262
AC 288
Achse 24, 74
Achssteuerung 234
Adaptive Regelung 220
Addition
– relativer BCD-Zahlen mittels
10-Komplements 39
16-Komplements 39
– relativer Dualzahlen 35
–, serielle 33
Adressenspeicher 138
Aikencode 29
Akkumulator-Rechenwerk 198
Analoge Meßverfahren 89
Analog-Interpolation 58
Ankersteuerung 244
Anpaßsteuerung, freiprogrammierbare 236
Anpassung 231
Anschlußkorrektur 207
Antriebe 239
Äquidistante 194, 204
Astabiler Multivibrator 166, 168
Ausblick 315
Ausfall 281
– abstand, mittlerer 283
– quote 282
– rate 282
Auslastungsregelung 290
Außeninterpolator 26, 193
Automat 19
Automatischer Schnittzyklus 291
AUTOTECH/SYMAP 307, 309

Bahnsteuerung 26, 130
BCD-dezimal-Umsetzung 106
BCD-dual-Umsetzung 215
BCD-Zähler 172
Bearbeitungszyklen 189
Befehlausgabe 226
Berührungsschutz 123
Betriebs/art 140
– leitebene 303
Bewegungsrichtung 74
Bezugs/maß, Umrechnung von – auf Kettenmaß 209
– maßsystem 23
– punkt 24
Binär 22
– codierte Dezimale (BCD) 28
Bit 19
B-Komplement 34
(B-1)-Komplement 35
Blockschaltbilder von NC 121
Boolsche Funktion 96
BTR-Anschluß 155, 300, 301
Byte 59

CNC 297
Code 58
–, einschrittiger 28
–, gesicherter 29
Codierung der Eingangsinformation 58
Compiler 308

Daten/fernübertragung 165
– nahübertragung 163
– verarbeitung, äußere 193
– verarbeitung, innere 117
– verwaltung 300
Dauerdrehmoment 242
DA-Wandler 229
DDA-Interpolator 201
DDA-Verfahren 42

Definition der numerischen Steuerung 14
Digital-absoluter Geber 86
Digitale Meßverfahren 79
Digitaler Vergleicher 224
Digitalisierungsfehler 21
Diodenkennlinie 227
Division von Dualzahlen 38
DNC 295, 300
Dreh/melder 89
– zahlen 72, 234
– zahlregelkreis 264
Dreiexzeß-Code 29
Dual 22
– code 28
– zahlen 35

Ecken/ergänzung 207
– verzögerung 265
EIA-Code 60
Eigenfrequenz 246
Eingabeablaufsteuerung 133
Eingangsschaltung 157
Ein-Impuls-Schaltung 142
Einsatz/breite der NC 17
– klasse 123
Elektrohydraulischer Antrieb 253
Endlagenschalter 232
Entropie 21
Entscheidungsgehalt 21
Entwicklungsgenerationen der NC 27
Ergänzungs/kreis 209
– schaltungen 110
Externer Abgleich 134

Feldschwächung 244
Fehler 265, 281
– betrachtung 216
– ortung 275, 278
Fertigungssteuerebene 300
Feste Zyklen 189, 212
Festwertverarbeitung 186
Formelzeichen 318
Freiprogrammierbare Anpaßsteuerung 236
Fremdkörperschutz 123
Frequenzteiler 217
Funktionsgenerator 196

Geber, absolut 161
Genauigkeitsklassen 76
Geometrische Stufung der Drehzahlen 217
Geradeninterpolation, DDA 43
– ,direkte Funktionsberechnung 48
Geschwindigkeits/fehler 265
– steuerung 217
– verstärkung 261
Gewindeschneiden 210
Gleichstromantrieb, geregelter 240
– Pulssteller 247
– Stellmotoren 252
– Vorschubantrieb 246
Glockenläufermotor 253
Graycode 28
Grenzendlagenschalter 232
Grobbearbeitung 186
Grobpositionieren 186
Großintegration 316

Hammingabstand 59
Handeingabe 142
Haupt/antriebe 244
– satz 60
Hohlläufermotor 253

IC-Baureihe D 10 96
Inbetriebnahme 280
Inductosyn 90, 161
Informations/ausgabe 224
– gehalt 19
– parameter 22
Inkrement 79
Inkrementale/Geber 79, 157
– innere Datenverarbeitung 169
– Verfahren 24
Inneninterpolator 26, 194
Innere Datenverarbeitung, absolute 177
Integrierte Schaltkreise 94
Interface, Standard- 300
Interpolation 61, 299
Interpolations/formel 44, 49, 53
– verfahren 41
Interpolator 193, 195, 202
Interruptsystem 301
ISO-7-bit-Code 60

Kartenbaugruppe (KBG) 118
–, Prüfgerät 277

Kettenmaß 156
– system 24
Kode siehe Code
Koinzidenz 23, 175
Komparator 107
Komplement
–, B- 34
–, (B-1)- 35
–, 16- 39
Komplexservicegerät 278
Konstantspannung 230
Konstruktiver Aufbau 270
Konvertierung 27, 29
Koordinatenrechner 203, 214
Kopplung, Störung durch- 111, 114
Korrektur, 6- 38
– impulseinblendung 169
– wertverarbeitung 157, 186
Kotelnikow 262
Kreisinterpolation, DDA 45
–, direkte Funktionsberechnung 51
Kreisstrom 245

Lage/messung 23
– regelung 260
Laserinterferometer 85
Lebensdauer 281
– verteilung 282
Leser/ansteuerung 282
– eingabe 147
Linearinterpolation 43, 48
Lochstreifen 148
– leser 147
Löschimpulsbildung 190

Manuelle Programmierung 304
Maschinelle Programmierung 307
Maßverkörperung 75
Meßsteuerung 294
Meßverfahren
–, absolute 77
–, analoge 89
–, digitale 79
–, relative 77
Meßwertgeber 86
Mikroelektronik 93
Minertia-Motor 253
Mittelpunktschaltung, dreipulsige 250
Modulation 83
Monostabiler Multivibrator 166
MOS-Technik 315
M-Speicher 232
Multiplikation
– von BCD-Zahlen 41
– von Dualzahlen 37
Multivibrator
–, astabiler 166, 168
–, monostabiler 166

Nachlauffehler 261
Nachricht 22
NAND-Technik 95
npn-Transistor, Kennlinie 227
Nulldurchgangslogik 170
Nullimpulsauswertung 158
Nullpunkttransformation 210
Numerische Steuerung, Definition 14

On-Line-Eingabe 155
Optimierungsregelung (ACO) 292
Optische Anzeigen 224
Optokoppler 316
Oszillator 168

Parabelinterpolation 67
Parallel-Serien-Umsetzer 139
Parallelsysteme 285
Paritäts/generator 105
– prüfung 59, 150
PMC 236
Positions/antrieb 220, 264
– anzeige 24, 121
Postprocessor 309
Processor 309
Programm 60
– aufbau 60
Programmierbare Steuerung 237
Programmiersprachen 307
Programmierung
–, manuelle 304
–, maschinelle 307
Programm/satz 60
– wort 60
Prozeß, diskontinuierlicher 14
– ebene 297
Prüfung 275
Prüfschrittabelle 277
Pseudotetrade 28
Punktsteuerung 25
Punkt-Strecken-Steuerung 124

Quellenprogramm 308

Rechenwerk 180
Rechner, serieller 182
Redundanz 22, 59, 282
Reflexionen 111, 113
Regelung 23
Regelkreis, Geschwindigkeits- 240
–, Lage- 260
Register als Speicher 155
Relative/Messung 77
– Zahlen 34
Resolver 161
Richtungsdiskriminator 158
Rohstromversorgung 267
RTL 94
Rückkonvertierung 29

Satzsuchlauf 154
Sätze (Datensätze, Programmsätze) 59
Schaltkreise
–, analoge 107
–, integrierte 93
Schaltverstärker 227
Scheibenläufermotor 253
Schieberegister 104, 139, 175
– Zählerkombination 134
Schnittiefenregelung 291
Schnittzyklus 291
Schnittzyklus, automatischer 291
Schrittantrieb 254
Schrittschaltwerk 235
Schutzklasse 121
6-Korrektur 38
16-Komplement 39
Serieller Rechner 182
Seriensysteme 285
Service 280
Shannon 262
Signal 22
–, analoges 22
–, digitales 22
–, diskretes 22
Sollwerteingabe 124
Spannungsregler 109
Speicher 104
–, Register als - 155
Spikes 111
Stabilisierungsbausteine 267
Standard/anschluß SI 1.2, SI 2.2 300
– Interface 163, 300
Standards 322
Starkstromteil 266
Steuer/algorithmus 19, 27
– ebene 297
– ketten 23
Steuerung 14
Steuerungshierarchie 295
Steuerwerk 177
Stör/abstand 111
– sicherheit 110
Störung durch Kopplung 111, 114
Streckensteuerung 25
Strom/begrenzung 250, 265
– regelung 251, 264
– versorgung 267
Stützkondensator 113
Subtraktor 33
Such-Schritt-Verfahren 48
SYMAP 310
Synchrone Arbeitsweise 165
Syntaxprüfung 59, 152

Tachogenerator, Hohlwellen- 253
Taktversorgung 165
Tastersynchronisation 142
Tetrade 28
Thyresch 245
Thyristor-Umkehrstromrichter 250
Tischumschlagbearbeitung 186, 210
Transistor-Transistor-Logik (TTL) 94
Triac 317
TTL-Standardbaureihe 99
–, Typenübersicht 99

Übersetzungsprogramm 308
Umkehr/spanne 246
– stromrichter 250
Ungleichförmigkeitsgrad 242
Unterprogramme 72

V-Abtastung 86
Variable Wortlänge 155
Verfahren direkter Funktionsberechnung 48
Verfügbarkeit 282
Verschleißmessung 289, 293
Verteiler 138

Verweilzeit 186
Vier-Quadranten-Antrieb 240
Volladder 32
Vorabschaltung 23, 175, 184
Vorabschaltmatrix 176
Vorcodiertabelle 304
Vorschübe 72
–, digitale 234
Vorschub/antrieb 246
– geschwindigkeit, konstante 221
– programmierung, direkte 218
– zahl 45, 47
Vorteile beim Einsatz von NC 16
Vorwahlschalter 143
Vorzeichen bei Linearinterpolation 50
VR-Zähler, schiebender 175

Wahrscheinlichkeit 282
Wälzschraubtrieb 82
Wärmetauscher 272
Wartung 280
Wegbedingungen 72, 156
Werkzeug/korrektur 203
– längenkorrektur 204
– lagekorrektur 204
– wechsel 235
Widerstands-Transistor-Logik (RTL) 94
Wortlänge, variable 155

Zähler 105, 179
Zahlen, relative 34
– darstellung 27
– systeme 27
Zeichenentschlüsselung 153
Zeit/abläufe 243
– plansteuerung 23
– schachtelungsprinzip 298
Zirkluarinterpolation 45, 51
Zusammenschaltbedingungen für IC 106
Zusatzfunktionen (M) 67, 156
Zuverlässigkeit 281
Zwischenspeicherung 138, 203
Zyklen, feste 72, 189, 212